

# 레이더 강우 자료를 이용한 도시유역의 유출 모의

강나래 · 노희성 · 이종소 · 임상훈\* · 김형수+

인하대학교 토목공학과

\* 한국건설기술연구원 수자원연구실

## Runoff Simulation of An Urban Drainage System Using Radar Rainfall Data

Na Rae Kang · Hui Seung Noh · Jong So Lee · Sang Hun Lim\* · Hung Soo Kim+

Department of Civil Engineering, Inha university

\* Water Resources Research Division, Korea Institute of Construction Technology

### 요 약

최근 공간적으로 지역적 편차가 심한 형태의 강우가 빈번히 발생하고 있으며, 기존 지점관측방식의 지상우량 관측망으로는 강우의 발생 및 이동을 고려한 공간적인 편차를 정확히 관측하는 것이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 강우의 시-공간적인 분포를 고려할 수 있는 레이더 강우를 도시 소유역에 적용하여 유출을 모의 하고자 하였다. 서울시 구로구 일대를 대상지역으로 선정하였으며, AWS (Automatic Weather Station)를 기준으로 소유역을 분할한 후, 지상 강우를 이용하여 레이더 강우자료를 보정하였다. 보정된 레이더 강우를 토대로 소유역별 면적강우량을 산정하였고, 도시배수시스템을 고려할 수 있는 XP-SWMM 모형을 이용하여 유출모의를 실시하였다. 소유역별로 보정된 레이더 강우자료는 지상강우량의 60~95% 수준을 나타내었다. 물론 강우의 양적인 차이로 인해 전체 유출량에 차이가 존재하였으며, 특히, 침투유출량의 발생시각이 빨라짐을 확인할 수 있었다. 본 연구는 레이더 강우를 도시유출 모형에 활용한 사례로 도심지의 홍수유출 예측을 위한 기술적 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

**핵심용어** : 레이더강우, 레이더 강우 보정, 도시배수시스템, XP-SWMM

### Abstract

In recent, the rainfall is showing different properties in space and time but the ground rain gauge only can observe rainfall at a point. This means the ground rain gauge has the limitations in spatial and temporal resolutions to measure rainfall and so there is a need to utilize radar rainfall which can consider spatial distribution of rainfall This study tried to apply radar rainfall for runoff simulation on an urban drainage system. The study area is Guro-gu, Seoul and we divided study area into subbasins based on rain gauge network of AWS(Automatic Weather station). Then the radar rainfalls were adjusted using rainfall data of rain gauge stations the areal rainfalls were obtained. The runoffs were simulated by using XP-SWMM model in subbasins of an urban drainage system. As the results, the adjusted radar rainfalls were underestimated in the range of 60 to 95% of rain gauge rainfalls and so the simulated runoffs from the adjusted radar and gauge rainfalls also showed the differences. The runoff peak time from radar rainfall was occurred more fast than that from gauge rainfall.

**Keywords** : Radar rainfall, Adjusted Radar Rainfall, Urban drainage system, XP-SWMM

## 1. 서론

최근 기후변화 및 이상기후 등 세계적인 기상이변의 증가로 인해 과거와는 달리 국지적 집중호우가 빈번히 발생하고 있다. 특히 급격한 도시화 및 산업화로 인해 도심지의 경우에는 비구름대가 조각난 형태로 통과하면서 지역적으로 강우량의 편차가 크게 나타나고, 동일 강우임에도 피해는 급격히 대형화되고 있어, 수문기상

학적 요소와 특성인자들의 상호 연관성 규명과 공간적 변동성 해석을 통한 홍수량 산정은 수자원 계획과 관리에 있어 중요한 요소라 할 수 있다.

지난 2010년 9월 21일 기상청은 중부지방을 중심으로 예상 강수량이 20~60mm 일 것으로 예상하였으나, 실제로는 서울에 259.5mm(강남 AWS : 293.0mm)로 예상 강수량의 3배 이상이 발생하였으며, 2011년 7월 27일과 2012년 8월 15일의 기록적인 집중호우로 인해 3년

+ Corresponding author : sookim@inha.ac.kr

연속으로 강남 일대가 침수되는 피해가 발생하였다. 이처럼 극한기상으로 인한 도심지의 침수재해를 방지하기 위한 공간단위의 정확한 강우 예측사전 및 예측 능력 향상이 필요한 시점이다.

지상우량계를 이용하여 강우를 측정하고자 할 때, 지상우량계의 정확도 확보와 더불어 강우의 시·공간적인 분포와 지역적 특성을 파악하기 위한 관측망의 밀도 조정 및 관측목적에 따른 관측망 구성이 필수적이다. 본 논문의 분석대상지를 포함하고 있는 서울시 전역에 설치된 지상우량계는 32개(18km<sup>2</sup>/개-AWS 기준)로 다른 지역에 비해 우량계의 밀도가 높다고는 하나, 최근 발생하는 도시 소유역의 집중호우 및 편차가 큰 강우 발생기작을 파악하고, 이에 따른 유출 해석과 예측을 하는데 있어 강우의 시·공간적인 변동성을 반영하기에는 어려움이 있다. 따라서 기존 지상우량 관측망의 간헐성에 의한 강우자료 확보가 용이하지 않은 유역의 수문해석에 있어서 강우의 시·공간적인 분포를 고려할 수 있고, 강우의 이동을 예측할 수 있는 레이더 강우자료의 활용은 지속적으로 시도되고 있다.

레이더 강우자료는 1km×1km 또는 그 이상의 해상도를 가진 격자(grid) 형태로 강우를 관측하기 때문에 일반적인 지상우량 관측망에 비해 상당히 높은 해상도의 강우정보를 제공할 수 있다. 또한 유역 수문학 측면에서 살펴보면, 레이더 강우자료는 지상우량관측에서 획득할 수 없는 미계측 유역에 대한 강우자료를 제공하는 장점이 있다. 그러나 지금까지 수문 분야에서 레이더 강우자료의 활용 연구를 살펴보면, 시·공간적 고해상도의 자료 제공 및 단기 강우 예측이 가능하다는 레이더의 장점에도 불구하고 레이더자료 자체만으로 강우를 정량화하고 수문학적 유출해석을 수행하기에는 아직까지 레이더강우량의 정확성에 대한 의구심이 제기되고 있다. 레이더자료의 장점을 충분히 활용하고자 격자(grid)단위의 입력자료로 활용 가능한 Vflo<sup>TM</sup>, SLURP 등 분포형 유역유출모형에 대한 연구가 주를 이루고 있으나 SWMM, ILLUDAS 등과 같은 집중형 도시유출모형에서의 레이더강우자료의 적용방법에 대한 연구가 부진한 상황이다. 따라서, 지상관측 강우량을 이용하여 다양한 통계기법을 통해 레이더 강우 보정에 관한 연구 및 이를 이용한 수자원 및 수문분석의 목적에 따라 고해상도의 레이더강우자료를 효율적으로 이용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

Bae et al.(2007)은 칼만필터 기법을 적용하여 레이더강우를 보정하고 Vflo<sup>TM</sup> 모형을 안성천유역에 적용하여 홍수모의를 실시하였으며, Kim et al.(2007)은 조건부합성 기법으로 보정한 레이더 강우와 분포형모형을 연계한 홍수량 산정방법을 제시하였다. 또한, Kim et al.(2008)은 공동크리깅(Co-Kriging)을 이용하여 레이더 강우와 우량

계 강우를 합성하고 연속수정법을 통해 자료 합성 결과를 정량적으로 분석하여 합성 자료의 통계적 특성과 정확도를 향상시키고자 하였으며, Bae et al.(2009)은 레이더 강우의 수문학적 활용을 위한 정확도 평가 방법을 제시하였다.

Kim et al.(2010)은 신경망의 학습을 통하여 레이더 강우를 보정하는 기법을 제시하였으며, Noh et al.(2012)은 MFB(Mean-Field Bias)보정기법과 새롭게 적용된 SOA(Statistical Objective Analysis) 보정기법을 통해 강우장을 생성하고 유출량 비교를 통해 레이더강우자료의 활용성 및 보정방법의 정확도를 평가하고자 하였다. 이러한 국내의 레이더자료의 수문분야 활용에 대한 연구 동향과 같이 레이더강우의 보정 및 유출해석에 대한 연구가 대부분이며, 도시유역에서의 레이더자료 분석 및 적용에 관한 연구는 이루어지지 않고 있다.

반면, 해외에서는 레이더를 이용한 기상관측이 1950년대에 본격적으로 이루어져 1980년대까지 비약적인 기술 발전을 이루었으며, 레이더 선진국이라 할 수 있는 미국은 NEXRAD((Next-Generation Radar) 레이더 네트워크를 이용하여 미국전역을 관측하고, 여기서 산출되는 다양한 자료를 이용한 여러 분야의 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한 유럽은 유럽기상레이더 네트워크 프로그램인 OPERA(Operational Programme for the Exchange of weather RADar information)를 운영하면서 기상관측과 수문분야의 레이더 활용에 대한 기술개발에 힘쓰고 있다.

Wilson and Brandes(1979)는 레이더를 이용한 면적 및 지점 강우량 추정에 대한 오류에 대하여 제시하고, 미국의 오클라호마와 뉴욕지역의 레이더-강우 보정계수를 제시하였다. 또한, Krajewski(1987)와 Seo(1998) 등이 적용한 크리깅기법, Ahnert et al.(1986)등이 적용한 칼만필터 방법은 레이더 강우의 공간오차를 추정하는 방법으로 이에 대한 개선연구가 최근까지 이루어지고 있다.

Krajewski et al.(1987)은 레이더 측정자료의 시·공간적인 분포에 따른 유역 유출영향 분석을 실시하였고, Bedient et al.(2000)는 홍수량 산정에 있어 지상 강우자료만큼의 정확성을 레이더자료가 확보할 수 있다는 연구 결과를 제시한바 있다. Vieux et al.(2005)은 레이더와 분포형 모형을 이용한 실시간 도시유출모의를 통해 QPE 자료가 도시유역에서의 유출모의에 유용함을 제시하였고, Villarini et al.(2010)은 레이더를 이용한 극한강우자료 생성 및 이를 이용한 도시유역의 홍수유출분석에 결과를 제시하였다. 최근, Berne et al.(2013)은 레이더강우 검증, 강우량 예측, 산악지역의 강우, 수문모형에서의 오류 전이 등과 같은 문제를 검토하고 레이더자료의 수문분야 적용에 있어서 구체적인 견해를 제안하고자 하였다.

레이더를 이용한 도시 소유역에 대한 강우-유출분석에 대한 연구는 최근 해외에서 활발히 이루어지고 있으

며, 본 논문은 국내 도시 소유역의 레이더자료 적용에 관한 연구의 필요성에 따라 강우의 공간적인 분포를 고려할 수 있는 레이더 강우를 도시 소유역에 적용하여 유출모의를 실시함으로써 기존 도시유출 모형의 적용 가능성을 을 제시하고자 하였다.

## 2. 레이더 강우의 보정과 도시 유출모형

### 2.1 지상강우를 이용한 레이더 강우 보정 기법

레이더를 이용한 강우관측은 강우의 공간적 변동성을 파악하는데 유리하지만, 레이더 관측 자료로부터 산출되는 강우량의 정확도는 아직 신뢰할만한 수준에 이르지 못하여 지상강우자료를 이용한 보정이 필요한 실정이다. 지상강우자료를 이용한 레이더강우의 보정(adjustment) 기법은 크게 “Gauge to Radar(G/R)비” 기법과 “정밀(sophisticated)”기법으로 구분할 수 있다(Barbosa,1994). G/R 기법은 레이더 연구 초기에 개발된 것으로 레이더 관측영역에 대하여 레이더자료와 지상강우자료간의 비율을 평균하여 곱해주는 방법이며, 정밀 기법은 지상우량의 정확성과 레이더 우량값의 공간분포특성을 이용하여 레이더 추정 우량값의 정확도를 높이고자하는 Co-Kriging, SOA, 칼만필터(Kalman filter) 등 여러가지 형태로 연구되고 있다(Noh et al, 2012). 본 논문에서는 G/R(MFB) 방법을 이용하여 레이더 강우의 보정을 실시하였으며, G/R 방법에 대해 간단히 살펴보면 다음과 같다.

#### 2.1.1 G/R 보정 기법

G/R 기법은 MFB(Mean Field Bias) 기법이라고 하며, 가장 보편적으로 쓰이고 있는 기법이다(Kim et al, 2007). 이 기법은 지상강우량과 레이더 강우의 보정계수를 계산하여 레이더 강우를 보정하는 기법으로써 현재 우리나라 기상청의 경우에도 이 기법을 이용하여 레이더 강우를 보정하고 있다. G/R법은 크게 단일 매개변수 우량계 보정 방법과 다중 매개변수 우량계 보정방법으로 구분할 수 있다.

본 연구에서는 지점에 대한 보정계수의 평균을 적용

하는 일반적인 단일 매개변수 우량계 보정기법으로 기본식은 다음과 같다.

$$R_c = f \times R_r \quad (f = R_g / R_r) \tag{1}$$

여기서,  $f$ : 각 Grid 보정계수,  $R_g$  : 지상강우 Grid포인트 우량,  $R_r$  : 레이더 Grid 포인트우량,  $R_c$ : 보정레이더 셀 우량을 나타낸다. G/R 기법은 지상강우를 이용한 레이더 강우량 보정방법에 있어서 간단한 계산식을 적용함으로써 보정강우량 생성 처리시간을 단축하는 장점을 가지고 있어 많은 레이더시스템에서 적용하고 있는 방법으로 레이더 추정 강우량의 정확도를 높이고 있으며, 본 연구에서도 G/R 기법을 적용하여 AWS 관측자료를 이용하여 레이더 강우자료를 보정하고 이를 도시유출 모형에 활용하고자 한다.

#### 2.1.2 레이더 강우의 검증

레이더 추정강우의 검증은 지상관측 강우량과 지상관측지점에 해당하는 레이더 격자(grid)의 레이더강우량 사이의 양적 관계와 품질을 평가하기 위한 과정으로, “얼마나 맞았는가?”를 판단하는 정성적인 검증과 “얼마나 정확한가?”를 판단하는 정량적인 검증으로 나눌 수 있으며, 두 방법 모두 강우추정의 대한 오차를 제공한다(Yoon, 2006).

강우의 정성적인 검증은 레이더 추정강우와 지상관측 강우의 강우발생 유·무에 따른 행렬로 이루어진 강우 분할표(Rain contingency table)에 기초한다(Yoon, 2006). 강우분할표는 레이더의 관측능력과 관측에서 발생하는 오차의 종류에 대한 정보를 주며, 다음과 같이 4개의 조합으로 구성된다(Table 1).  $C$ 와  $H$ 는 지상관측강우의 유·무에 따라 레이더 강우의 관측이 적중한 경우를 나타내며,  $F$ 와  $M$ 은 레이더 강우의 관측이 지상강우 관측과 틀린 경우에 해당한다.  $N$ 은 관측강우의 총 수로  $C+F+M+H$ 라고 할 수 있다. 그리고 무엇을 검증하기 위한 정량적인 통계검증 방법으로 평균오차(Mean Error, ME), 절대평균오차(Mean Absolute Error, MAE), 평균제곱오차(Root Mean Square Error, RMSE) 등이 있다.

Table 1. Rain contingency table

Rain contingency table		Radar rainfall	
		No rain (=0)	Rain ( $\geq 0.5\text{mm}$ )
Ground observed rainfall	No rain (=0)	C (Correct Negative)	F (False)
	Rain ( $\geq 0.5\text{mm}$ )	M (Miss)	H (Hit)

## 2.2 XP-SWMM 모형

XP-SWMM은 주로 도시구역에서 단일호우나 연속호우사상으로 인해 발생하는 지표면 유출 및 지하수 흐름, 관로 시스템 내에서의 흐름을 모의하여 유출량 및 수질의 변화를 분석하는 모형이다. 연구에서 사용된 SWMM은 미 환경보존국(Environmental Protection Agency)의 지원 아래 개발된 개념적 도시 유출(conceptual urban runoff) 모형으로서, 주로도시구역에 대한 배수체계의 설계와 계획에 많이 사용되고 있다(Javaheri, 1998). XP-SWMM 모형은 강우-유출 해석조건에 따라 Runoff 블록, Transport 블록, Extran 블록을 조합하여 부경류 해석을 실시함으로써 기존 모형에서 해석하지 못하였던 수리구조물로 인한 월류, 배수효과, 압력류, 지표면 저류 등의 수리현상 및 관로 내 수질변화 모의를 동시에 수행할 수 있도록 구성되어 있다. XP-SWMM은 미국 XP Software사에서 EPA SWMM을 사용자의 편의 확보를 위하여 윈도우화 한 것으로 기본적인 해석 방법이나 구조는 기존과 동일하다.

## 3. 적용 및 토의

유출분석에 있어 강우자료는 매우 중요한 입력자료로 유역의 수문 및 유출분석을 하기 위해서는 유역의 평균 우량 산정이 선행되어야 한다. AWS(Automatic Weather System)을 기준으로 대상지역을 소유역으로 분할하였으며, 보정된 레이더 강우와 지상 강우자료를 이용하여 소유역별 면적강우량을 산정하였다. 강우의 공간적인 분포를 고려할 수 있는 레이더 강우를 이용하여 도시 소유역의 적용 및 유출모의를 하고자 하였으며, 도시유출 모형으로 XP-SWMM 모형을 이용하였다. 개략적인 연구 흐름도는 Fig. 1과 같다.

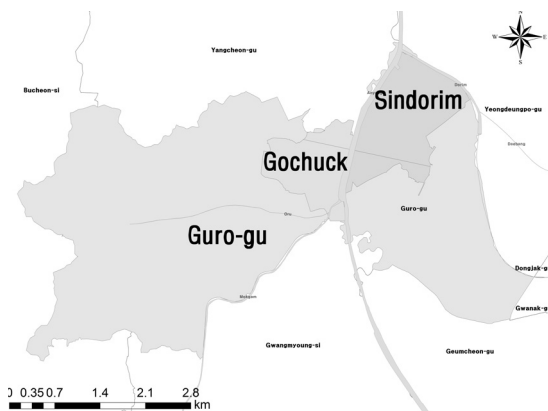


Figure 2. Study area

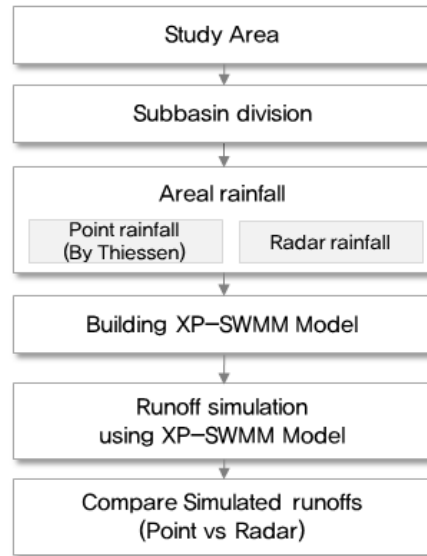


Figure 1. Flowchart

### 3.1 대상 유역

본 연구의 대상지역은 행정구역상 서울시 구로구 고척1동과 신도림동, 구로2동, 구로5동 일원으로 Fig. 2와 같이 고척 1배수분구와 신도림 배수분구를 대상유역으로 선정하였다. 대상지역은 대상유역 내에 기상관측소 및 AWS가 존재하지 않는 지역으로 강우자료 확보가 용이하지 않는 지역이다. 고척1 배수분구의 유역면적은 132.22ha로 안양천으로 배수되고 있으며, 신도림 배수분구는 221.81ha로 도림천 배수구역에 해당한다.

인근 AWS 강우 관측소에 Thiessen법을 적용하여 강우관측망(Fig. 3)을 구성하여보면, 고척1과 신도림 배수분구는 양천과 광명관측소의 지배면적에 포함이 되고 있다. 소유역별 강우 적용을 위해 Fig. 3과 같이 (Thiessen망을 기준) 고척\_1, 고척\_2, 신도림\_1, 신도림\_2과 같이 4개의 소유역으로 분할하였다.

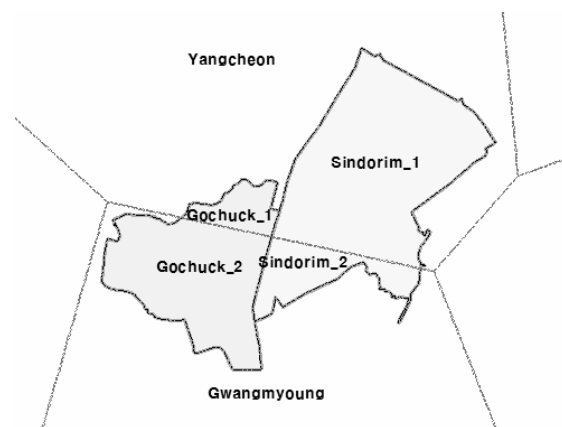


Figure 3. Subbasin division by Thiessen

### 3.2 대상 강우레이더

본 연구에서는 국토해양부에서 홍수예보 목적으로 사용하고 있는 임진강 강우레이더 관측소의 자료를 이용하였다. 임진강 강우레이더는 2001년에 준공되어 북쪽의

임진강 유역을 관측대상으로 하지만, 북한강 일부 및 한강 유역의 안성천, 안양천, 경안천, 탄천 등의 일부 하천 유역에 대한 관측도 가능하다. 임진강 강우레이더의 강우관측 반경은 170km이며(Fig. 4), 자세한 관측소의 제원은 Table 2와 같다.

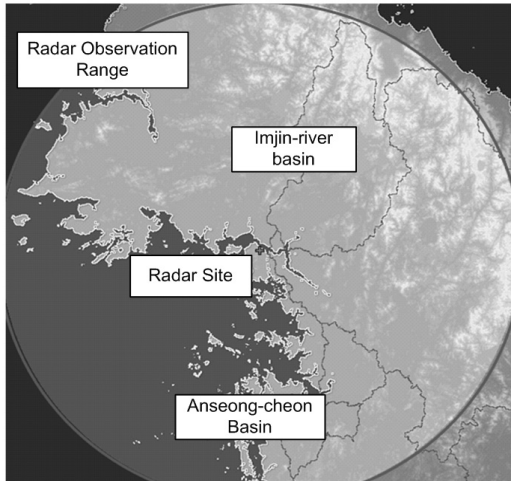


Figure 4. Imjin river rainfall radar

Table 2. Summary of Imjin river rainfall radar characteristics and observation modes

Radar site	ImJin river radar
Location	Incheon-city, Ganghwa-gun, Songhae-myeon
Radar system	TDR-43250C
Observation range	170km
Frequency	5,645GHz
Peak power	250KW
Z-R equation	$Z = 31R^{1.17}$
Antenna velocity	15 deg/sec(2.5rpm)
Elevation umber	0.4°~2.2° (12)
Launch date	2001. 3. 30

### 3.3 소유역별 레이더 강우량 산정

대상 호우사상으로 2012년 8월 14일 15:00부터 17일 21:00까지의 기간 동안의 강우자료를 수집하였으며, 레

이더 자료를 추출하였다. Fig. 5의 (a)는 임진강 강우레이더의 CAPPI(1.5km) 영상자료로서 반사도 값을 나타내고 있으며, Fig 5의 (b),(c)는 대상 호우사상 기간의 레이더강우(30분 강우강도)영상자료를 보여주고 있다.

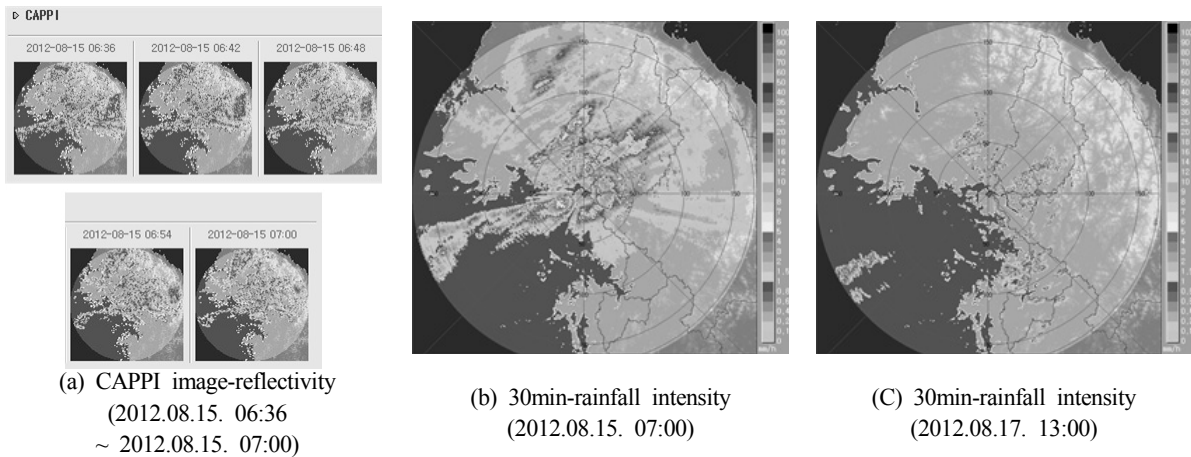


Figure 5. Images of CAPPI and rainfall intensities

본 연구에서는 G/R 기법을 적용하여 기상청에서 제공한 지상관측강우 자료인 AWS 관측자료를 이용하여 강우레이더 자료를 보정하고자 하였으며, 레이더 추정 강우량과 지상관측 강우량 유무의 행렬로 이루어진 강우 분할표를 이용하여 보정계수( $f$ )를 산정하였다. 앞서 2.1.2절에서 설명한 강우 분할표에 의해 분류된 4가지

지표 중 레이더강우의 정확도(Accuracy, ACC)는 식(2)와 같이 나타낼 수 있는데, 정확도와 관련된 지표는  $C$  (Correct Negative)와  $H$ (Hit)이다.  $C$ 와  $H$ 는 지상관측강우 값의 유·무에 따라 레이더 강우의 관측이 적중한 경우와 적중하지 못한 경우의 비율을 의미한다. 즉,  $C$ 는 지상강우관측 값이 0(무강우)일 때 레이더 강우에서도

관측이 이루어지지 않은 경우이며,  $H$ 는 지상강우관측 값이 0.5mm이상(강우발생)일 때 레이더 강우에서도 강우가 관측되는 경우에 해당한다.

$$ACC = \frac{\text{Correct radar rain}}{\text{Total vumber}} = \frac{C+H}{N} \quad \text{식(2)}$$

그러나 레이더강우의 정확도(ACC)는 무강우 관측이 많을 경우  $C$ 값에 영향을 많이 받아 적중률이 좋아지는 결과를 보이기 때문에 정확한 추정강우의 적중률을 평가하는데 어려움이 있다(Yoon, 2006). 따라서 보정계수 ( $f$ )산정에 있어  $H$ 에 해당하는 경우만을 고려하여 레이더 강우를 보정하였으며, AWS의 최소관측 단위(0.5mm)를 고려하여 강우 발생의 기준 단위를 0.5mm로 설정하였다.

Fig. 6은 대상지역 인근의 강우관측소 지점(AWS-광명,양천)의 티센망을 이용한 소유역별 강우량과 보정레이더 강우장의 소유역별 강우량을 비교한 그림이다. 면적강우량 생성시 기존의 티센방법(Fig.6(a))은 지상우량값을 이용하여 면적비로 계산하기 때문에 같은 배수구역 내에서도 상당한 강우 차이가 존재하며, 격자단위로 직접 추정된 점 강우량을 면적강우량으로 산출한 레이더 강우량(Fig.6(b))과 비교하여 대상유역과 같이 소유역이고 강우변동성이 심할 경우 오차가 레이더강우량의 오차 보다 크게 나타난다.

Table 3는 2012년 8월 15일 06:00의 강우에 대하여 지상우량계와 강우레이더에 의해 산정된 강우량 결과를 나타낸 것이다. 지상 우량계에 의해 산정된 고척 배수분

구의 강우는 고척\_1은 0.44mm, 고척\_2는 3.61mm이나 레이더보정 강우에 의해 산정된 강우를 살펴보면, 고척\_1은 3.08mm, 고척\_2는 3.52mm로 산정되었다. 신도림 배수분구의 경우, 지상우량계에 의해 산정된 강우는 신도림\_1은 2.29mm, 신도림\_2는 0.78mm이나 레이더 강우에 의하면, 신도림\_1은 2.32mm, 신도림\_2는 2.84mm로 산정되었다. 이처럼 본 대상지역과 같이 배수구역이 동일한 강우관측소의 영향 하에 있지 않고, 여러 강우관측소의 지배면적에 포함된 경우, 지상 우량계는 관측지점들 사이의 공간적인 강수의 변동성을 반영하지 못하기 때문에 같은 배수구역 내에서도 지배면적의 영향에 따라 강우량의 차이가 있는 것을 확인할 수 있다(Fig. 6). 따라서 같은 배수구역 내에서도 지배면적 차이로 인해 유역의 유출량 모의나 예측에 있어서도 차이가 존재할 것이며, 대상지역의 유출 모의시 이러한 경향을 반영할 필요가 있다.

Fig. 7(a)는 대상 호우사상에 대한 30분 누적강우량과 보정레이더 강우량의 누가강우량을 비교한 것으로, 강우량의 참값으로 가정하는 지상관측 강우량과 비교하였을 때, 보정레이더 강우량은 60~95% 수준을 나타내고 있다. 또한, 지점별 Q-Q plot을 살펴보면, 각각의 30분 누적강우량에 대한 레이더보정 강우량과 지상관측 강우량과의 관계를 파악할 수 있다. 그래프 기울기가 1:1 선형에 더 근접할수록 참값인 지상강우량 값과 레이더보정 강우량이 일치하는 경향을 나타냄을 의미하며, 두 값의 상관계수는 고척\_1은 0.858, 고척\_2는 0.765, 신도림\_1은 0.844, 신도림\_2은 0.770으로 양호한 결과를 얻었음을 알 수 있다.

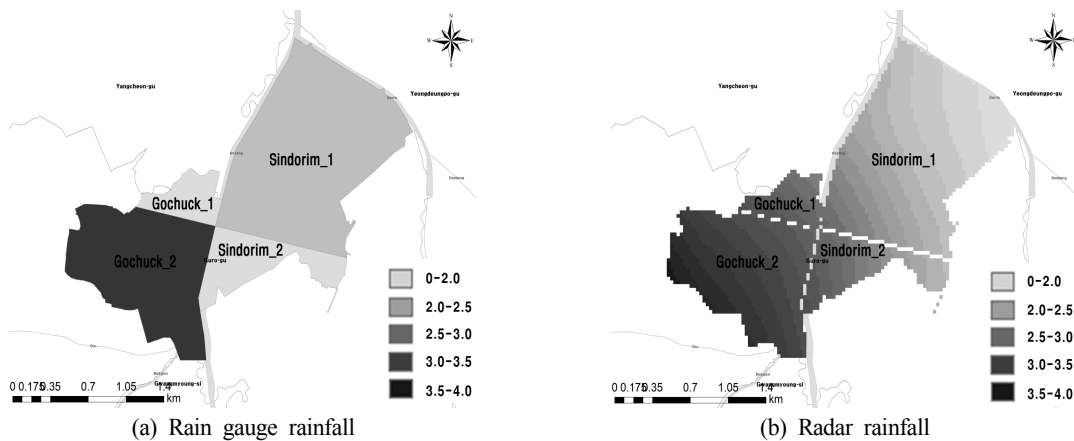


Figure 6. Comparison of rain gauge rainfall and radar rainfall (2012. 8. 15. 06:00)

Table 3. Rainfall for each subbasin (unit : mm)

Drainage area	Gochuck		Sindorim	
	Go._1	Go._2	Sin._1	Sin._2
Rainfall				
Rain gauge	0.44	3.61	2.29	0.78
Radar	3.08	3.52	2.32	2.84

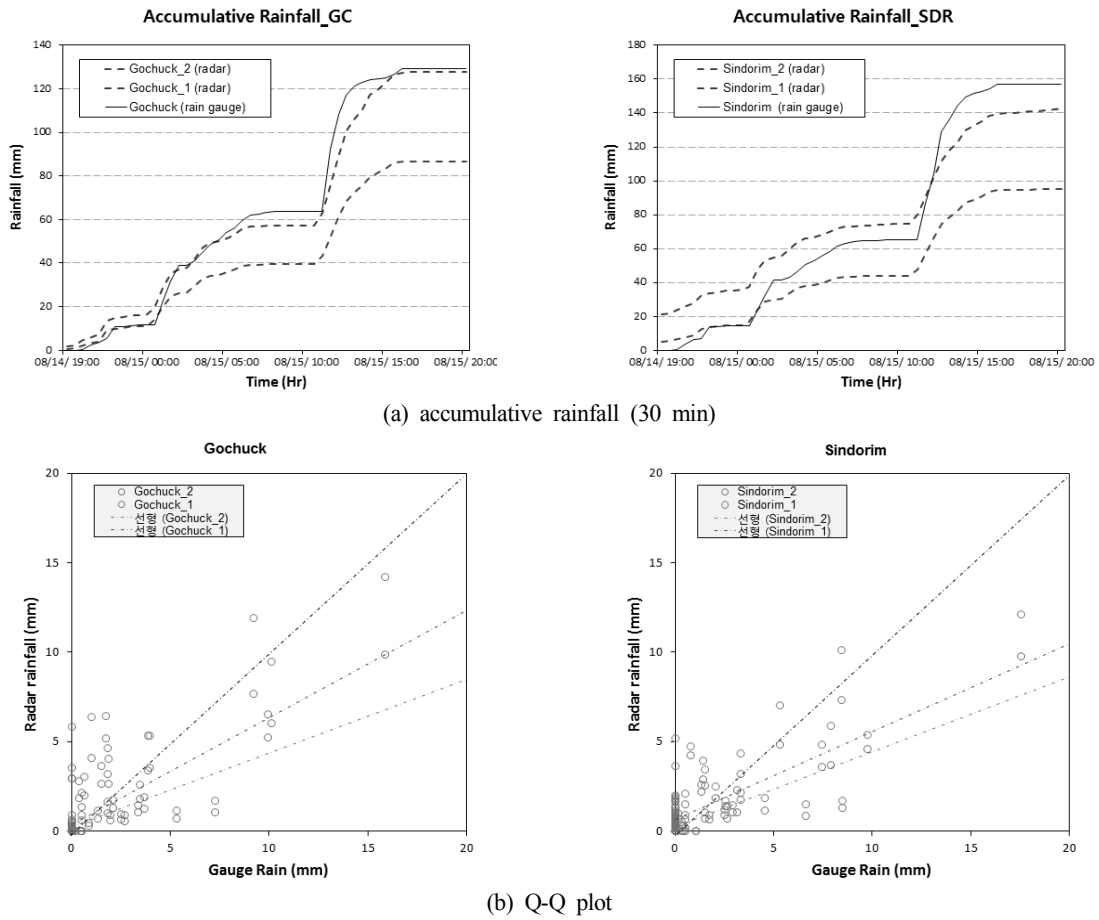


Figure 7. Comparison of accumulated gauge rainfall and radar rainfall

### 3.4 XP-SWMM 모형을 이용한 유출모의

XP-SWMM을 이용한 도시유출 모의를 위해 Fig. 8과 같이 분구별 관거 하도망을 구축하였으며, 앞서 산정된 소유역별 레이더 강우와 지상 강우를 구분하여 입력자료로 활용하였으며, 앞서 보정한 소유역별 레이더 강우를 적용하여 유출모의를 실시하였다.

먼저 유출모의에 앞서 구축된 모형이 대상유역의 유출 특성을 적절하게 모의할 수 있는지에 대한 검증이

필요하다. 관거를 통해 배수되는 유역의 유출량은 유출부에 설치된 펌프장의 유입량으로 산정할 수 있으나, 본 대상유역은 펌프장이 설치되지 않는 지역으로 실측값과 비교하는 것은 불가능하다. 본 연구에서는 2001년 7월 14일~15일에 발생한 기왕 최대 강우(시간당 99.5mm/h)를 적용하여 유출모의를 실시하고 실제 발생한 침수상황을 비교하였다. 고척분구, 신도림 분구 모두 실제 침수상황과 근사하게 모의하고 있는 것으로 확인되었으며, 소유역별 레이더 강우를 적용하여 유출모의를 실시하였다.

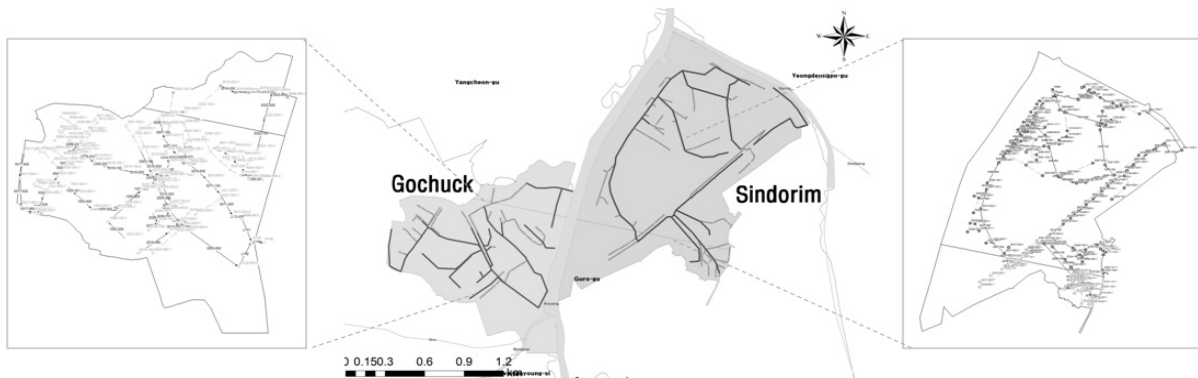


Figure 8. Pipe network of study area

유역별로 분할된 지상 강우 및 레이더보정 강우를 이용한 도시 소유역의 유출모의 결과는 Fig. 10에 도시하였다. 레이더보정 강우를 이용한 강우 유출은 지상 강우의 유출양상에 비해 첨두량 및 유출량이 작게 산정되었으며, 고척1분구의 경우, 레이더 강우에 의한 첨두 유출량 발생시간이 지상 강우(광명, ①)에 의한 발생시간보다 20분 정도 늦어졌으며, 신도림 분구의 경우, 지상 강우(양천, ②)에 의한 첨두유출량 발생시간에 비해 30분 가량의 첨두유출량의 발생시간이 빨라졌다. 이는 유출특성이 강우의 이동방향과 유역의 형상에 영향을 의한 것으

로 판단된다. 이동방향에 따른 강우의 도달순서를 살펴 보면, Fig 9와 같이 광명 관측소(①), 대상유역(②), 양천 관측소(③) 순으로 강우가 도달하게 된다.

지상 강우의 적용 시, 고척1분구는 강우가 실제 대상 유역에 도달하기 전인 광명지점의 강우의 영향을 받으며, 신도림 분구는 강우가 대상유역을 빠져나간 뒤인 양천 관측소의 도달한 강우에 영향을 받게 된다. 이로 인해 위와 같이 레이더 강우와 지상강우 사이의 강우량 및 유출시간의 차이가 발생한 것으로 판단된다.

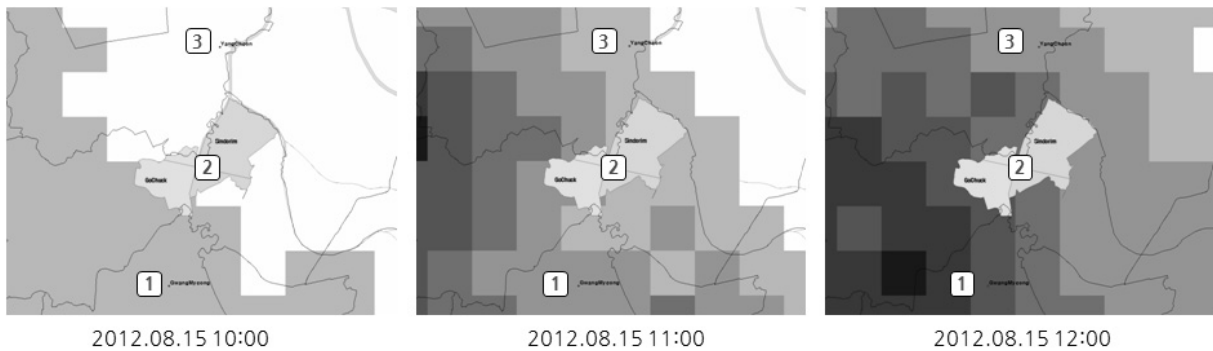


Figure 9. The direction of movement of rainfall

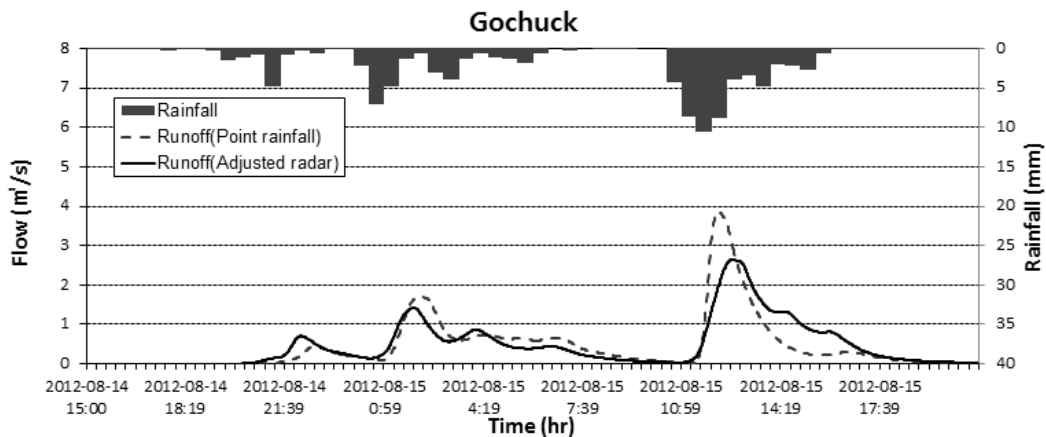
## 6. 결론

본 연구는 강우의 시공간적인 분포를 고려할 수 있는 레이더 강우를 이용하여 도시유출 모형에 적용 가능한 방법을 제시하고자 하였으며, 도시 소유역에서 레이더 강우에 의한 유출모의 및 적용성을 평가하고자 하였다. 본 연구의 내용을 요약하면 다음과 같다.

배수구역이 동일한 강우관측소의 영향 하에 있지 않고 여러 강우관측소의 지배면적에 포함된 경우, 레이더

강우는 점강우와 비교하여 시간과 공간에 따라 변화하는 강우의 양상을 측정함에 있어 매우 뛰어난 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다.

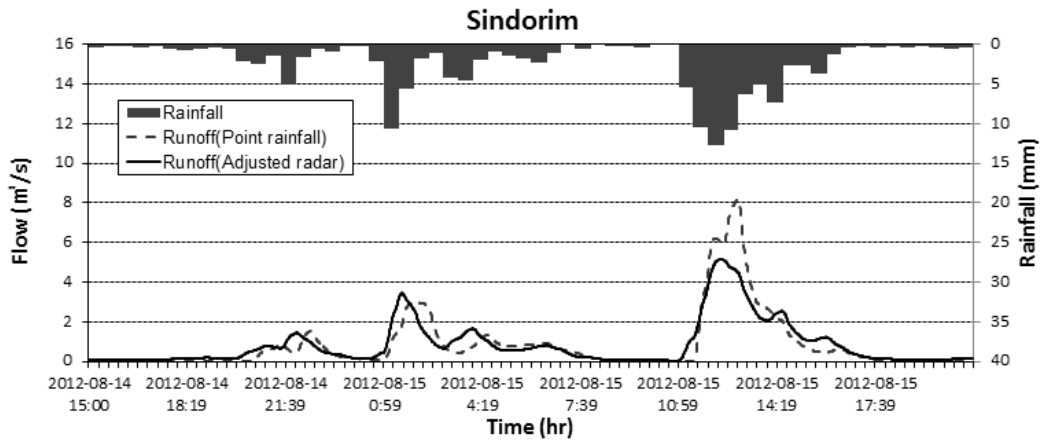
대상 배수유역에 대하여 Thiessen법과 레이더 강우를 이용하여 면적강우량을 산정한 결과, 강우량의 참값으로 가정하는 지상관측 강우량과 비교하였을 때, 60-95% 수준을 나타내고 있었으며, 소유역별 상관계수는 고척\_1은 0.858, 고척\_2는 0.765, 신도림\_1은 0.844, 신도림\_2은 0.770으로 양호한 결과를 얻었음을 알 수 있다.



(a) Gochuck drainage area

Figure 10. Comparison of simulated runoffs from gauge rainfall and radar rainfall





(b) Sindorim drainage area

Figure 10. Comparison of simulated runoffs from gauge rainfall and radar rainfall (continued)

G/R 보정기법을 통해 과소 추정된 레이더 강우의 정확도를 높이고자 하였다. 고척1 및 신도림 배수구역에 대하여 보정계수( $f$ )를 적용한 결과, Thiessen법을 적용했을 때보다 강우의 시공간적 특성과 함께 지상강우의 특성까지 반영할 수 있었으며, 소유역별로 분할된 지상 강우 및 레이더 강우를 이용한 도시 소유역의 유출모의 결과, 레이더보정 강우를 이용한 강우 유출은 지상 강우의 유출양상에 비해 첨두량 및 유출량이 작게 산정되었다.

고척1분구의 경우, 첨두유출량 발생시간이 20분 정도 늦어졌으며, 신도림 분구의 경우, 지상 강우에 의한 첨두유출량 발생시간에 비해 30분 가량의 첨두유출량의 발생시간이 빨라졌다. 이는 유출특성이 강우의 이동방향과 유역의 형상에 영향에 의한 것으로 판단된다.

집중호우 등에 의한 도심지 침수 방지 및 대비를 위한 사전예측 능력향상, 정확한 강우 예측을 위하여 강우 레이더의 활용성이 커지고 있는 만큼 본 연구는 집중형 도시유출 모형에서의 레이더 강우의 활용을 위한 기술적 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(수문레이더 기반 홍수예경보 및 폭설 추정 플랫폼 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

Ahnert, PR, Krajewski, WF, and Johnson ER (1986). Kalman filter estimation of radar-rainfall field bias, reprints, 23rd Conference on Radar Meteorology, Am. Meteor. Soc, Snowmass, CO, pp. JP33-JP37

Bae, DH, Tran, AP, and Yoon, SS (2009). A Method to Evaluate the Radar Rainfall Accuracy for Hydrological Application. *Korea Water Resources Association*, 42(12), pp. 1039-1052. [Korean Literature]

Bae, YH, Kim, BS, Kim, HS, Seo, BH (2007). Radar Rainfall Adjustment by Kalman-Filter Method and Flood Simulation using two Distributed Models. *Proceedings of the 2007 Conference of the Korean Society of Civil Engineers*, Korean Society of Civil Engineers, pp. 2040-2045. [Korean Literature]

Barbosa, S (1994). Brief review of radar-raingauge adjustment techniques. *Advances in Radar Hydrology*, EC, Brussels, pp. 148-169.

Bedient, PB, Hoblit, BC, Gladwell, DC, Vieux, BE (2000). NEXRAD radar for flood prediction in Houston. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5(3), pp. 269-277.

Berne, A, Krajewski WF (2012). Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential? *Advances in Water Resources*, 51(35), pp. 357-366.

Hong, SJ, Kim, BS, Halm, CH (2010). Spatial-Temporal Interpolation of Rainfall Using Rain Gauge and Radar, *Journal of the Korean society for geo-spatial information system*, 18(3), pp. 37-48. [Korean Literature]

Javaheri, H (1998) Automatic calibration of urban run-off models using global optimization techniques, M.Sc. thesis, McGill University, Montreal, Canada.

Kim, BS, Hong, JB, Kim, HS, and Choi, KH (2007). Combining radar and rain gauge rainfall estimates for flood forecasting using conditional merging method. *Korean Society of Civil Engineers*, 27(3), pp. 255-265. [Korean Literature]

Kim, KJ, Choi, JH, and Yoo, CS (2008). Synthesis of

- radar measurements and ground measurements using the Successive Correction Method (SCM). *Korea Water Resources Association*, 41(7), pp. 681-692. [Korean Literature]
- Kim, SJ, Kwon, YS, Lee, KJ, Kim, HS (2010). Radar Rainfall Adjustment by Artificial Neural Network and Runoff Analysis. *Journal of Korea Society of Civil Engineers*, 30(2B), pp. 159-167. [Korean Literature]
- Krajewski, WF (1987). Co-kriging of radar-rainfall and rain gauge data, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(D8), pp. 9571-9580.
- Ministry of Science and Technology (2004). Water Resources Application of Short-and Long Term Weather Forecasts. [Korean Literature]
- Noh, HS, Kang, NR, Kim, BS, Kim, HS (2012). Flood Simulation using Vflo and Radar Rainfall Adjustment Data by Statistical Objective Analysis. *Korean Wetlands Society*, 14(2), pp. 243-254. [Korean Literature]
- Seo, DJ (1998). Real-time estimation of rainfall fields using radar rainfall and rain gage data. *Journal of Hydrology*, 208(1-2), pp. 25-36.
- Vieux, BE, PB. Bedient, E. Mazroi (2005). Real-time urban runoff simulation using radar rainfall and physics-based distributed modeling for site-specific forecasts. *10th International Conference on Urban Drainage*.
- Villarini, G, Smith, JA, Baeck, ML, Sturdevant-Rees, P, and Krajewski, WF (2010). Radar analyses of extreme rainfall and flooding in urban drainage basins, *Journal of Hydrology*, 381(3-4), pp. 266-286.
- Wilson, JW and Brandes, EA (1979). Radar measurement of rainfall - a summary. *American Meteorological Society*, 60(9), pp. 1048-1058.
- Yoon, SS (2006). Applicability of Radar Rainfall Estimation for Runoff Analysis, *Master's Thesis*, Sejong university. [Korean Literature]
- 논문접수일 : 2013년 07월 25일
  - 심사의뢰일 : 2013년 07월 25일
  - 심사완료일 : 2013년 08월 02일