

고해상도 QPE 자료의 도시유출해석 적용성 평가

Evaluation of High-Resolution QPE data for Urban Runoff Analysis

최수민* / 윤성심** / 이병주*** / 최영진****

Choi, Sumin / Yoon, Seongsim / Lee, Byongju / Choi, Youngjean

Abstract

In this study, urban runoff analyses were performed using high resolution Quantitative Precipitation Estimation (QPE), and variation of rainfall and runoff were analyzed to evaluate QPE data for urban runoff analysis. The five drainage districts (Seocho3, 4, 5, Yeoksam and Nonhyun) around Gangnam station were chosen as study area, the area is 7.4 km². Rainfall data from KMA AWS (34 stations), SKP AWS (156 stations) and Gwanduk radar were used for QPEs in Seoul area. Four types of QPE(QPE1: KMA AWS, QPE2: KMA+ SKP AWS, QPE3: Gwangduk radar, QPE4: QPE2+QPE3) of 6 events in July 2013 were generated by using Krigging and conditional merging. The temporal and spatial resolution of QPEs are 10 minutes and 250 m, respectively. The complex pipe network were treated as 773 manholes, 772 sub-drainage districts and 1,059 pipelines for urban runoff analysis as input data. QPE2 and QPE4 show spatial variation of rainfall by sub-drainage districts as 1.9 times bigger than QPE1. The peak runoff of QPE2 and QPE4 also show spatial variation as 6 times bigger than Gangnam and Seocho AWS. Thus, the spatial variation of rainfall and runoff could exist in small area such as this study area, and using high-resolution rainfall data is desirable for accurate urban runoff analysis.

Keywords : QPE, urban runoff analysis, Gangnam station, spatial variation of rainfall

요 지

본 연구의 목적은 고해상도 정량적강수추정치(QPE)를 이용하여 도시유출해석을 수행하고 소배수분구별 강우와 유출량의 공간 변동성을 분석하여 적용성을 평가하는 것이다. 대상유역은 강남역을 중심으로 하는 5개 배수분구(서초3, 4, 5, 역삼, 논현)를 선정하였으며, 유역면적은 7.4 km²이다. QPE 생산을 위해 KMA AWS (34소), SKP AWS (156소), 광덕산 레이더 자료를 통해 서울지역의 강우자료를 구축하였으며 크리깅 기법과 조건부합성 방법을 적용하여 4가지 QPE(QPE1: KMA AWS, QPE2: KMA+SKP AWS, QPE3: 광덕산 레이더, QPE4: QPE2+QPE3)를 생산하였다. 시공간 해상도는 10분, 250 m이며, 2013년 7월에 발생한 6개 호우를 대상으로 하였다. 복잡한 실제 관망을 도시유출해석모형에 입력하기 위해 773개 맨홀과 772개 소배수분구, 1,059개 하수관거로 재구성하여 분석을 수행하였다. QPE2와 QPE4는 QPE1에 비해 소배수구역별 면적강우량의 변동폭이 최대 1.9배까지 차이가 나타나 작은 유역에서도 강우공간변동성이 있음을 확인하였다. 또한 소배수구역별 침투유량 분석결과에서도 강남과 서초 AWS에 비해 QPE2와 QPE4의 변동폭이 최대 6배 큰 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구의 대상지역과 같이 수 km² 이하의 도시유역에서도 강우와 침투유량의 공간변동성이 발생함을 알 수 있었으며, 정확한 도시유출해석을 위해서는 고해상도 강우자료를 활용하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

핵심용어 : QPE, 도시유출해석, 강남역, 강우공간변동성

* 한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단 연구원 (e-mail: sumin0114@gmail.com)

Researcher, WISE Institute, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi, Korea

** 한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단 선임연구원 (e-mail: seongsimyon@gmail.com)

Senior Researcher, WISE Institute, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi, Korea

*** 교신저자, 한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단 책임연구원 (e-mail: bjlee0704@gmail.com, Tel: 82-2-7850-6830)

Corresponding Author, Principal Researcher, WISE Institute, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi, Korea

**** 한국외국어대학교 차세대도시농림융합기상사업단 단장 (e-mail: junowise@hufs.ac.kr)

Director, WISE Institute, Hankuk University of Foreign Studies, Yongin, Gyeonggi, Korea

1. 서론

이미 수차례 반복된 도시지역의 집중호우에 의한 침수 피해는 높은 인구밀도와 밀집된 산업지역 등의 특성 때문에 사회적·경제적으로 큰 이슈가 되고 있다. 2010년 9월과 2011년 7월에 발생한 서울지역의 침수피해는 대표적인 도시침수 사례이며, 최근 2014년 8월에 발생한 부산지역의 침수 또한 800억 원 이상의 피해로 특별재난지역으로 선포된 바 있다.

매년 반복되는 도시침수에 대한 사회적 관심이 고조됨에 따라 침수를 사전에 예방하고 피해를 저감시키기 위해 각 지역별로 다양한 대책 및 계획이 수립되고 있다. 이를 위해 현재의 잠재적 침수 위험을 평가하고 이전에 발생한 침수의 원인을 분석하는 것이 선행되는데, 이때 해당 지역의 관망 및 지형자료를 기반으로 도시유출해석을 수행한다. XP-SWMM이나 MIKE URBAN, ILLUDAS 등과 같은 모형이 도시유출해석을 위해 사용되고 있으며, 강우 입력자료로는 주로 대상지역 인근의 AWS 관측자료를 사용한다.

서울의 경우에는 기상청에서 운영하고 있는 AWS가 약 18km 밀도로 설치되어 있어 다른 지역에 비해 강우량 측정소의 밀도가 높지만, 집중호우와 같이 공간분포의 편차가 큰 사상에 대해서는 이에 따른 유출을 예측하는데 어려움이 있다. 이와 같이 도시 소유역이나 강우의 공간적 편차가 큰 지역에 대한 강우예측에 관심이 커짐에 따라, 최근에는 레이더 강우자료를 활용한 도시유출해석에 관한 연구가 많이 수행되고 있다.

Park et al. (2007)과 Noh et al. (2012)은 MFB(Mean-Field Bias) 보정기법과 SOA(Statistical Objective Analysis)보정기법을 이용해 레이더 강우장을 생성하고 분포형 수문모형인 Vflo에 입력하여 남강댐유역 및 감천유역에 적용한바 있으며, Kang et al. (2013)은 레이더 강우를 도시 소유역에 적용하기 위해 지상 강우를 이용해 강우자료 보정을 수행하고 XP-SWMM에 입력하여 서울시 구로구 일대의 도시유출해석을 수행하였다. 또한 Yoon et al. (2014)은 삼성역 주변 배수분구에 대해 레이더 예측강우를 이용하여 침수해석을 수행하고 지상강우를 이용한 해석 결과와 비교하여 적용성을 평가하였다.

반면, NEXRAD(Next-Generation Radar)나 OPERA(Operational Programme for the Exchange of weather Radar Information)과 같은 레이더 네트워크를 구축하고 있는 미국이나 유럽의 경우에는 기상관측 뿐 아니라 이를 수문분야에 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있

다. Bedient et al. (2000)과 Vieux et al. (2005)은 Brays Bayou 지역의 실시간 도시유출 해석을 위해 NEXRAD의 S-band와 X-band 레이더로부터 산정된 QPE(Quantitative Precipitation Estimation)를 Vflo 모형에 적용하여 유출모의에 대한 활용성을 검토하였으며, Clarke et al. (2009)은 UDFCD(Urban Drainage and Flood Control District) Alert에 사용되는 강우관측자료와 지상관측강우로 보정된 1km 격자의 레이더 강우를 이용한 수문곡선을 비교하여 정확성을 평가하였다.

이와 같이 국내외에서는 레이더를 이용해 시공간적 정확도가 높은 강우자료를 개발하고 이를 활용하기 위한 연구가 다양하게 진행되고 있으나, 대부분의 강우 공간해상도가 1km이므로 도시 유출에 적합한 소배수분구의 MAP로 활용하기에는 부적합할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 서울지역에 조밀하게 구축되어 있는 AWS 지상강우 관측자료와 광덕산 레이더 자료를 이용해 산정한 250m 해상도의 QPE 강우장을 SWMM의 강우 입력자료로 사용하여 강남 지역에 대한 도시유출해석을 수행하고, 하수관 관측 수심과 모의 결과 비교 및 소배수분구별 침투 유출량의 공간편차를 분석함으로써 도시유출해석에서 고해상도 강우자료에 대한 적용성을 검토하고자 한다.

2. 대상유역 및 입력자료 구축

2.1 대상지역 선정

본 연구에서는 강남역 일대 침수지역에 대한 도시유출 해석을 위해 논현, 역삼, 서초3, 4, 5 배수분구를 대상지역으로 선정하였다. 강남역 주변은 강남대로와 테헤란로가 교차하고, 주거지역과 상업지역이 밀집한 서울의 대표적인 도심지역이며, 주변지역에 비해 상대적으로 저지대이고 복잡한 하수관망을 가지고 있어 집중호우로 인한 침수 위험이 높은 지역이라 할 수 있다. 실제 2010년 9월 21일과 2011년 7월 27일 집중호우로 인해 대상지역 내에서 많은 침수가 발생하였다(National Emergency Management Agency, 2011; 2012).

5개 배수분구의 형상과 위치는 Fig. 1과 같다. 대상지역 면적은 7.4km²이며 각 배수분구별 면적은 논현(NH) 1.8km², 역삼(YS) 1.9km², 서초3(SC3) 1.8km², 서초4(SC4) 1.1km², 서초5(SC5) 0.8km²이다. 대상지역 내에는 서초(SC)와 사평(SP) 빗물펌프장이 위치하고 있으며, 모두 반포천을 통해 방류한다. 그림에서 화살표 방향은 관측수심 지점 상류에서의 관망흐름방향을 의미한다.

2.2 지형자료 구축

하수관망도는 서울시로부터 제공받았으며 도시유출흐름을 상세하게 모의하기 위해 773개 맨홀과 772개 소배수분구, 1,059개 하수관거로 재구축하였다. 각 소배수분구 평균사는 5×5m 수치표고도(국토지리정보원), 불투수율은 서울시 도시생태현황도, 유출곡선지수(CN)는 30×30m 토지피복도(국토교통부)와 1:25000 정밀토양도(국립

농업과학원)를 이용하여 산정하였다. 소배수분구 면적은 0.0002~0.435 km²로 평균 0.01 km²이며, 경사는 0.001~10.092%이고 평균 1.801%로 나타났다. 강남역의 북동쪽에 위치한 국기원 부근은 언덕으로 인해 평균경사가 높으며, 강남역 부근이 상대적으로 경사가 낮고 저지대임을 알 수 있다. 소배수분구별 불투수율은 10.6~100%, CN은 Lee et al. (2003)이 제안한 방법을 적용하였으며 47~95 범위를 갖는 것으로 나타났다.

2.3 강우자료 구축

대상지역에 대한 QPE를 생산하기 위해 기상청(KMA)과 SK 플래닛(SKIP)에서 운영하는 지상우량계(AWS)와 광덕산 레이더자료를 활용하였다. 기상청은 서울시 행정구역 내 27소 AWS를 운영하고 있으며 서울시 외곽 인근에 존재하는 AWS 7소를 추가로 고려하여 34소 AWS의 관측자료를 QPE 산정에 적용하였다. SK 플래닛은 2013년 7월부터 서울시 행정구역 내 262소의 복합기상센서를 설치하여 운영하고 있으며 1분 간격으로 강우량, 기온, 습도, 풍향, 풍속, 기압을 관측하고 있다. Yoon et al. (2015a)에서는 2013년 7월 1일부터 9월 30일까지 3개월 동안 1분 간격으로 관측된 정보를 수집하여 결측치와 이상치를 평가하였으며 결측률 20% 미만에 해당하는 156개소를 선정하고 공간표준편차 분석 및 Madsen-Allerup 방법을 적용하여 오차보정을 수행하였다. 또한 SKIP 관측소 인접 KMA 관측소와 상호비교를 통해 SKIP 관측자료의 신뢰성을 제시하였다. 본 연구에는 Yoon et al. (2015a)에서 보정된 강우자료를 활용하였다. 최종적으로 SKIP AWS 156소와 KMA AWS 34소를 결합하여 총 190소의 AWS 자료를 이용하였으며 서울시 행정구역면적을 기준으로 우량계의

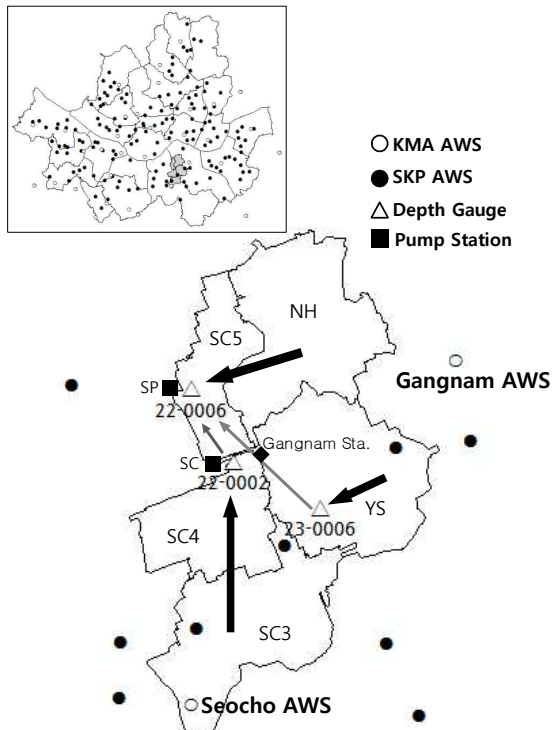


Fig. 1. Study Area

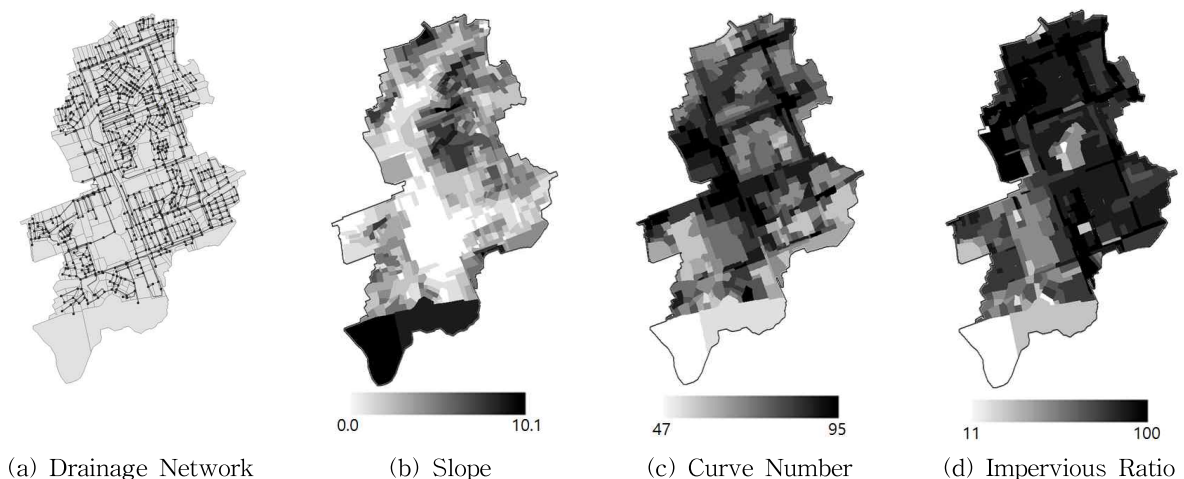


Fig. 2. Geographical Input Data for SWMM Model

평균공간해상도는 약 1.78 km이다.

레이더 자료는 서울시 전체 지역을 포함하는 광덕산 레이더 자료(최대 반경 250 km)를 사용하였으며, 시간해상도는 10분, 공간해상도는 250 m를 가진다.

본 연구에서는 다양한 방법으로 산정된 QPE의 도시유출모형에 대한 적용성을 평가하기 위해 Table 1과 같이 6 가지 강우자료를 구축하였다. AWS1과 AWS2는 각각 강남과 서초 AWS에서 관측된 강우자료가 대상지역 전체에 균일하게 내린다고 가정된 형태이다. QPE1과 QPE2는 각각 KMA AWS만 적용한 경우와 SKP AWS 추가한 자료로부터 Kriging 방법을 이용하여 분석장을 만든 결과이다. QPE3은 광덕산 레이더 자료와 M-P 식($Z=200R^{1.6}$)을 적용한 결과이며 QPE4는 QPE2와 QPE3자료로부터 조건부합성 방법(Sinclair and Pegram, 2005; Yoon and Bae, 2013; Yoon et al., 2015b)으로 산정된 결과이다. 조건부합성 방법은 지점강우자료로부터 얻은 강우량과 레이더 자료로부터 얻은 강우장의 공간적 구조를 합성하는 방법으로, 본 연구에서는 190개 AWS 관측자료의 강우량과 광덕산 레이더자료의 강우 공간구조를 합성하여 QPE4를 산정하였다. Yoon et al. (2015b)은 본 연구에서 적용한 QPE1~4에 대해 정확도 분석을 수행하였으며 교차검증을 수행한 결과 SKP AWS 자료를 적용함에 따라 상관계수와 평균제곱근오차에서 정확도가 개선됨을 제시한 바 있다.

Fig. 3은 QPE1, 2, 3의 강우장을 각 격자에 대해 2013년 7월(1달) 누적강우량을 산정하고 이를 서울시 대상지역 내 전체격자에 대해 정규화하여 빈도분포를 도시한 결과이다. QPE1과 QPE2는 중앙집중형태를 가지나 QPE1은 초과확률 80% 이상에서도 많은 강우가 발생하는 반면에 QPE2는 발생빈도가 초과확률 50%(X축 0.5) 이후 점진적으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 레이더자료로부터 산정된 QPE3은 초과확률 30%(X축 0.3)에서 발생빈도가 가장 높으며 이후 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 통상 지점강우량은 지상우량계 관측값이 참값에 가깝고 공

간분포는 레이더자료가 참값에 가깝다고 가정할 때 초과확률 50% 이상의 발생빈도에서 QPE2가 레이더자료로부터 산정된 QPE3과 비슷한 형태이며 QPE1은 상당한 오차를 포함한다고 할 수 있다. QPE1과 QPE2가 각각 우량계 34소와 190소를 이용한 결과임을 고려할 때 공간분포에서도 QPE2가 더 신뢰성이 높다고 할 수 있으며 이는 Yoon et al. (2015b)의 결과와도 일치한다.

SWMM 입력자료로 구축된 소배수분구의 면적은 0.0002 ~ 0.435 km²이므로 면적평균강우량 산정 시 강우의 공간적 특성을 반영하기 위해 공간해상도는 250 m의 고해상도 QPE를 생산하여 적용하였다.

3. 호우사상 선정 및 분석

3.1 호우사상 선정

호우사상은 SK 플래넷 자료의 가용 기간을 고려하여 2013년 7월에 발생한 6개 호우사상을 선정하였다. Table 2는 각 호우기간에 대해 강남(GN)과 서초(SC) AWS의

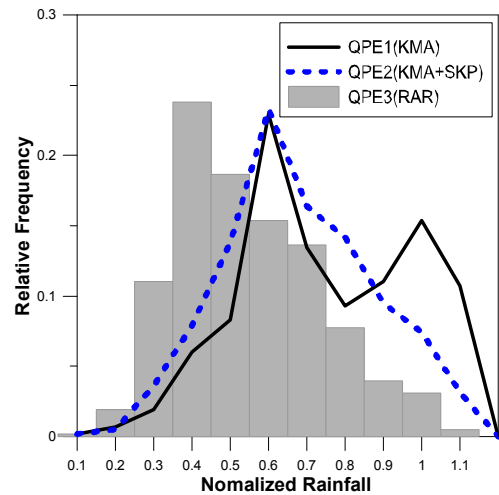


Fig. 3. Frequency Distribution using Normalized Cumulative Rainfall of QPE1, 2, and 3 in July 2013

Table 1. Rainfall Input Data Types

QPE type	Data Source	Estimation Method	Spatial Resolution (m)
AWS1	Only Gangnam AWS	Uniform	-
AWS2	Only Seocho AWS	Uniform	-
QPE1	34 AWSs from KMA	Kriging interpolation	250
QPE2	190 AWSs from KMA and SKP	Kriging interpolation	250
QPE3	Gwangduk-San Radar	M-P equation	250
QPE4	QPE2, QPE3	Conditional Merging	250

관측강우량으로부터 산정된 총강우량, 10분과 60분 강우 강도 결과이다. 두 관측소의 직선거리는 약 3.7 km임에도 불구하고, Event2에서는 총강우량뿐 아니라 강우강도에서 약 40% 정도 차이를 보였다. 또한, 동일시간대 10분 강우량의 최대 편차는 평균적으로 5.7 mm 정도이나, Event5의 6시 20분에 관측된 강우량은 11.5 mm의 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 이와 같은 결과를 통해 인접한 두 지점이라 하더라도 강우사상에 따라 양적·공간적으로 차이가

있음을 확인하였으며, 이는 도시유출해석결과에도 상당한 영향을 줄 것으로 판단된다.

3.2 소비수분구 면적평균강우량 분석

6개 호우사상에 대해 강남과 서초 AWS 관측자료, 4가지 QPE를 이용하여 773개 소비수분구에 대한 면적평균강우량을 산정하였다. Fig. 4는 각 호우사상에 대한 소비수분구별 면적평균강우량의 변동폭을 분석한 결과이다. QPE1

Table 2. Rainfall Events and Characteristics

Event	Period '13.7.xx (24h)	AWS Site	Total Rainfall	Max. Rainfall Intensity		Max. Deviation
				10 min.	60 min.	
1	02 (24h)	GN	37.9	8.0	16.0	3.5
		SC	33.4	4.5	12.5	
2	04 (24h)	GN	28.0	9.3	23.9	6.7
		SC	34.5	16.0	32.0	
3	12~14 (72h)	GN	191.5	7.0	24.4	4.5
		SC	183.5	8.0	33.2	
4	15 (24h)	GN	22.4	8.5	13.5	4.0
		SC	23.4	7.5	14.0	
5	22 (24h)	GN	130.7	14.0	60.0	11.5
		SC	124.0	17.5	63.6	
6	23 (24h)	GN	43.2	6.0	22.8	4.0
		SC	36.3	5.5	19.5	

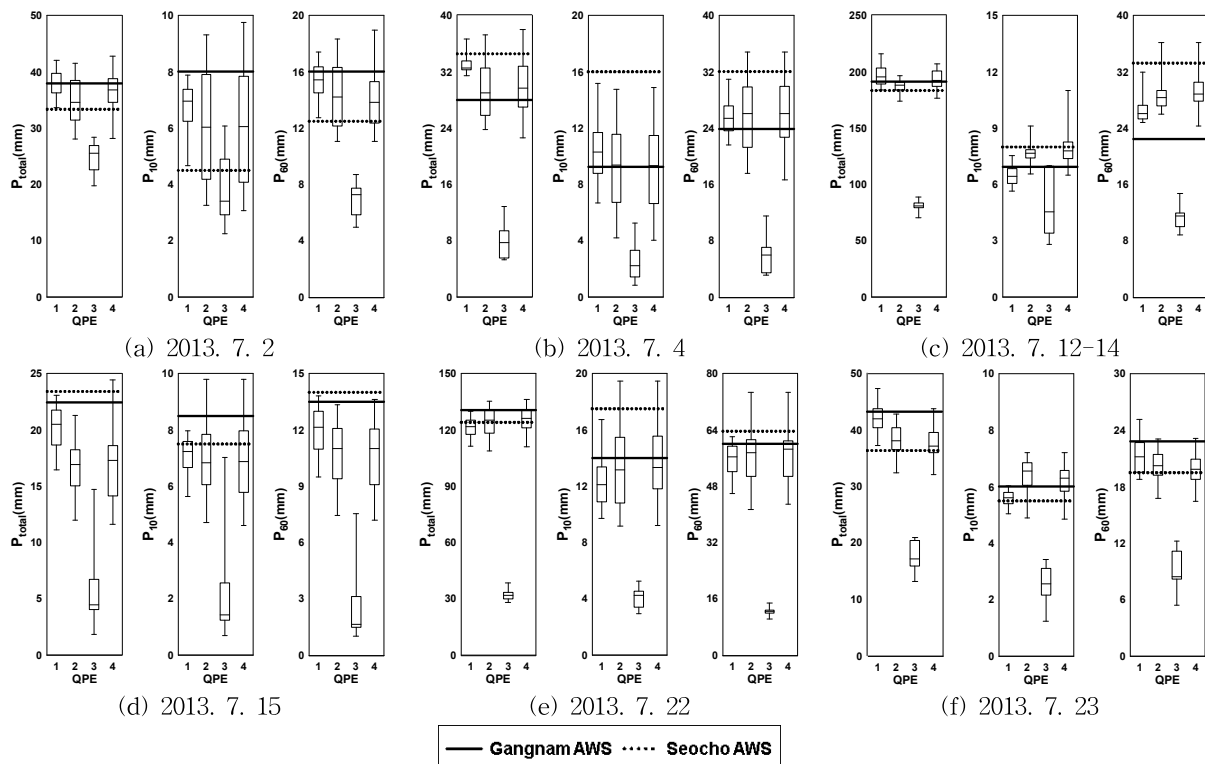


Fig. 4. Box-Whisker Plot of Mean Areal Precipitation (MAP) on Sub-drainage District Area using 4 QPEs

은 기상청 34개 AWS를 이용하여 강우분포장을 생산한 결과이므로 공간적인 변동폭이 다른 QPE에 비해 작게 나타남을 확인할 수 있다. 또한 QPE2와 QPE4는 레이더 자료의 적용 유무의 차이가 있지만 생산과정에서 190개 AWS 강우자료가 공통적으로 적용됨에 따라 공간변동폭이 유사하게 나타났다. QPE3은 광덕산 레이더 자료를 이용하여 M-P 관계식($Z=200R^{1.6}$)을 적용한 결과이며 각 사상별로 변동폭이 상이하고 다른 강우결과에 비해 과소 추정됨을 확인할 수 있다.

이를 통해 QPE1에 비해 관측값이 조밀한 QPE2, 3, 4는 양적 차이는 있으나 대상유역 내 소배수분구별로 서로 상이한 MAP가 발생함을 확인하였다. QPE3는 QPE1, 2, 4를 비롯하여 강남과 서초AWS 관측값에 비해 평균적으로 26.2~58.5% 정도 과소 추정되어 정량적인 신뢰도는 떨어지는 것으로 판단된다.

4. 적용 및 평가

4.1 하수관거 내 모의 수심 평가

강남역을 중심으로 논현, 역삼, 서초3, 4, 5 배수분구에 대해 SWMM 입력자료를 구축하고, 서울시 구(區)별 1일 1인당 하수량 자료와 무강우 시 수심자료를 토대로 시간별 수심자료를 구축하여 합류식관거의 초기 수심자료로 적용하였다. 또한 2013년 7월의 6개 강우사상에 대해 생산한 QPE와 강남 및 서초 AWS 관측강우자료를 이용하여 각각의 강우자료에 대한 도시유출해석을 수행하였다.

SWMM 모형의 매개변수는 가장 조밀한 강우관측소 자료를 이용한 QPE2 자료를 기준으로 6개 강우사상에 대한 대표매개변수를 수동보정방법을 이용하여 추정하였다. 매개변수는 유출결과에 민감한 소배수분구의 불투수율, CN, 유역폭을 채택하였다. 각 강우자료별로 매개변수를 추정할 경우 최종 추정된 매개변수가 각각 다를 수 있겠으나 본 연구에서는 단순히 어떤 강우자료를 이용한 유출모의결과가 정확한가를 결정하기보다 도시유출해석 시 소배수분구에 대한 강우의 공간변동성과 이로 인한 유출량의 공간변동성을 분석하는 것이 주목적이므로 매개변수를 QPE2의 결과로 통일하여 분석을 수행하였다.

SWMM 모형의 매개변수 최적화를 위해서는 통상 관측유량자료가 이용되나 본 대상지역에는 관측유량자료 확보가 어려워 서울시 물재생계획과에서 운영하고 있는 하수도관리전산시스템의 하수관 관측수위자료를 이용하였다. 서울시는 2014년 기준 94소 대해 초음파식 센서를

이용하여 1분단위로 관측자료를 수집하고 있다. 본 대상 지역에는 7소가 운영되고 있으나 자료의 가용성을 고려하여 Fig. 1에 나타낸 3소의 자료를 사용하였고, 각각의 수위계는 합류식 관거의 연계 맨홀을 통해 설치되어 있다. 22-0006 지점은 논현 배수분구와 서초5 배수분구의 하수가 지나가며, 22-0002 지점은 서초3, 4 배수분구, 23-0006 지점은 역삼 배수분구의 하수가 영향을 미친다.

SWMM에서 해석된 수심과 관측 수심을 비교하였으며, 주요 시간에 대해 모의한 결과는 Fig. 5와 같다. 대체적으로 22-0006 지점은 강남 AWS가 가까운 논현 및 서초5 배수분구의 영향을 받기 때문에 서초 AWS에서 관측된 강우보다 강남 AWS에서 관측된 강우패턴을 더 잘 따르는 것으로 나타났으며, 서초 AWS가 위치한 서초3, 4 배수분구의 영향을 받는 22-0002 지점에서는 반대의 양상이 나타났다. 두 관측소의 강우량 차이가 적은 7월 15일 사상에서는 두 결과가 거의 차이가 없는 것으로 나타났으며, 7월 12~14일과 22일과 같이 두 관측소에서 관측된 강우의 시간적 양상이 다른 경우에는 모의된 수심의 패턴에서도 차이가 나타났다. 반면, 이렇게 두 관측소에서 차이가 큰 사상뿐 아니라 다른 사상에서도 지점 강우자료보다 QPE1과 QPE2, QPE4를 입력한 모의결과가 관측 수심 거동을 더 잘 따르는 것으로 분석되었다.

대체적으로 모든 강우자료가 침투수심 발생시간과 수심변화양상을 잘 모의하는 것으로 나타났으며, QPE2와 QPE4를 강우자료로 입력한 경우에는 모의 결과가 거의 유사하였다. 반면, 강우자료 분석과 마찬가지로 강우량이 과소추정된 QPE3의 경우에는 강우자료 분석과 동일하게 SWMM 해석에도 다른 강우자료를 입력하였을 때에 비해 수심을 확연히 작게 모의하는 것으로 나타났다.

각 모의결과에 대해 강우사상 및 강우입력자료, 수심관측지점에 따른 평균제곱근오차(Root Mean Square Error, RMSE)와 침투수심상대오차(Relative Error of Peak Depth, REPD)를 산정하여 모의 정확도에 대해 평가하였다.

RMSE는 QPE4가 평균 0.126으로 가장 낮았으며, 다음으로 QPE1과 QPE2 (0.128), 서초AWS (0.162), 강남AWS (0.165), QPE3 (0.333) 순이었다. REPD 또한 QPE4와 QPE2가 각각 평균 7.83%와 8.64%로 가장 낮았으며, QPE1 (9.97%), 강남AWS (13.28%), 서초AWS (16.33%), QPE3 (57.21%) 순으로 나타났다.

이와 같은 결과는 인근의 지점자료를 사용하는 것 보다 강우의 공간적 분포를 가지는 자료를 사용하는 것이 침투수심 예측에 더 유의한 결과를 도출하는 것을 보여준다고 할 수 있다.

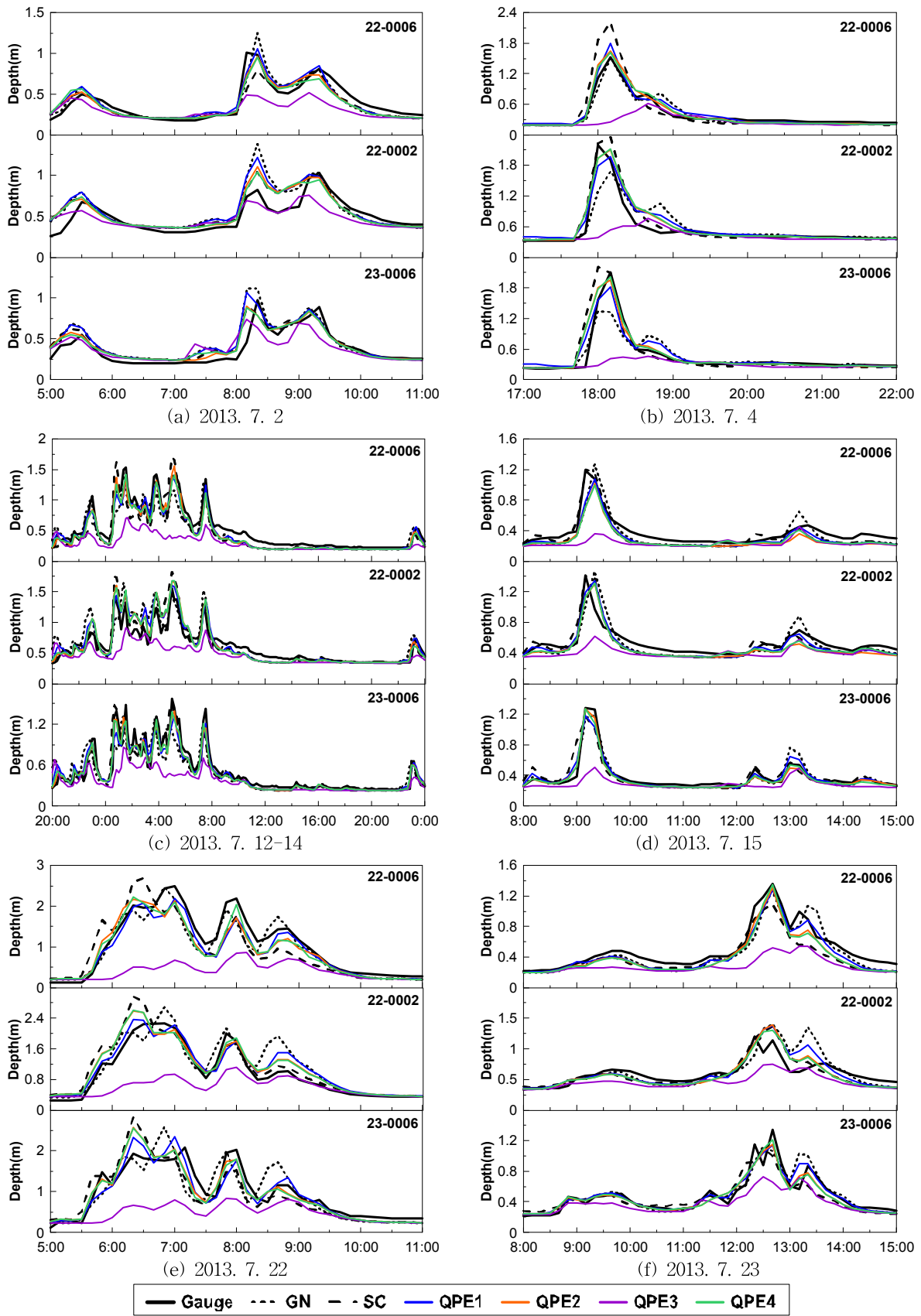


Fig. 5. Comparison Observation and Simulation Depth in Manhole

4.2 소배수분구별 침투유출량 평가

Fig. 6은 772개 소배수분구에서 발생한 단위면적당 침투유출량의 분포를 도시한 것이다. 소배수분구별 MAP의 분포와 마찬가지로 QPE1에 비해 QPE2와 QPE4를 입력자료로 이용하였을 때의 침투유출량의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. 특히, AWS 지점자료를 이용하였을 때에는 변동폭이 상대적으로 작게 나타났는데, 1~3분위의 범위를 비교해보면 QPE2와 QPE4가 AWS 지점자료에 비해 변동폭이 최대 6배까지 큰 것으로 분석되었다. 결과적으로 강우의 공간적 변동성이 유출해석에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기는 어려우나, 소배수분구의 침투유출량 변동폭 분석을 통해 작은 도시유역에 대해 유출해석시 강우의 공간 분포가 침투유출량에 큰 영향을 줄 수 있음을 알 수 있다. 도시유출해석에서 국지성 강우의 공간적 특성을 반영하기 위해서는 이러한 특성을 잘 반영할 수 있는 강우자료를 사용해야 할 것으로 판단된다.

또한, QPE3의 경우에는 다른 자료에 비해 현저히 과소 추정되기 때문에 사용에 주의가 필요하며, 고해상도의 도시유출해석을 위해서는 QPE2 또는 QPE4를 사용하는 것

이 QPE1이나 지점자료를 사용하는 것에 비해 정확한 결과를 도출할 수 있을 것이다.

5. 결론

본 연구에서는 서울시에 조밀하게 구축되어 있는 강우 관측망 및 레이더의 관측자료를 통해 산정된 4가지 QPE 강우장과 인근 AWS의 지점 강우자료와 SWMM을 이용하여 강남역을 중심으로 5개 배수분구에 대한 도시유출해석을 수행하였다. 이를 통해 수 km^2 이하의 도시유역에 대한 유출해석 시 고해상도 강우자료 적용에 따른 소배수분구에서의 공간 변동성을 분석하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

- 1) 대상유역 인근에 위치한 강남과 서초 AWS 관측소의 직선거리는 약 3.7km인데, 10분 최대 강우량은 약 40%까지 차이가 있었으며, 동일 시간 최대 편차는 66%로 나타나 수 km 이내의 좁은 지역에서도 양적·공간적 차이가 있음을 확인하였다.
- 2) 4가지 QPE 강우장에 대하여 772개 소배수분구별 면적평균강우량을 산정하고 변동폭을 분석한 결과, 산

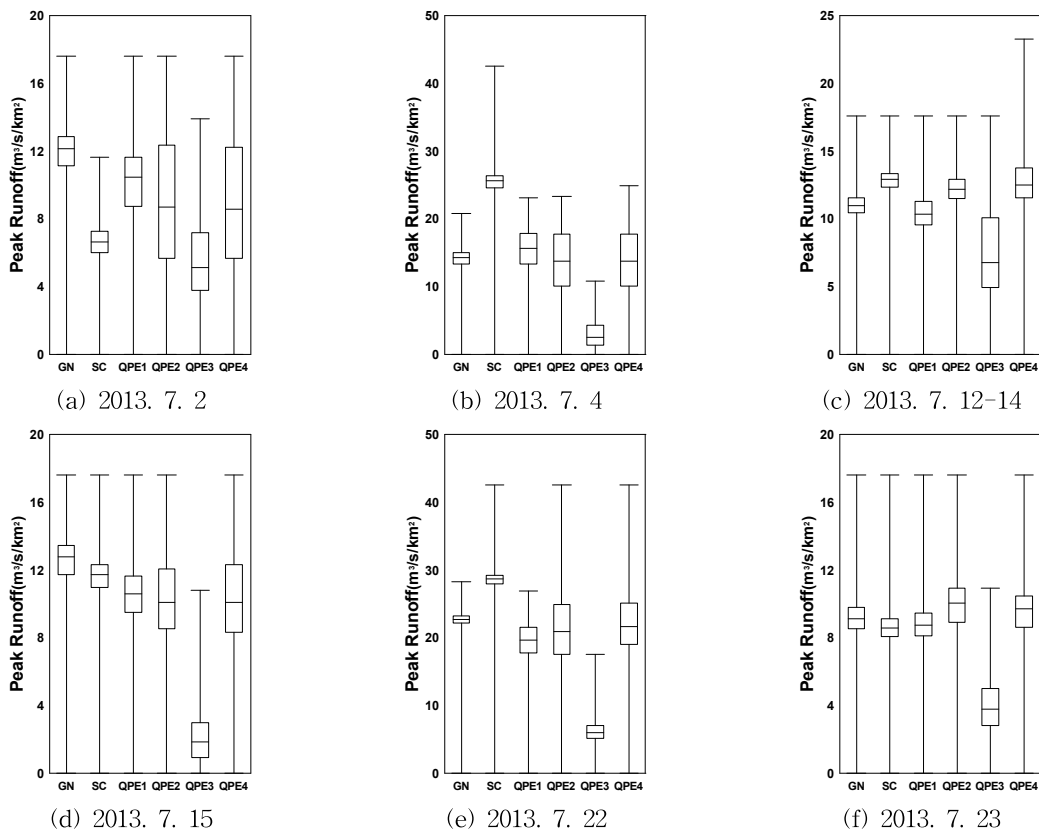


Fig. 6. Box-Whisker Plot of Peak Runoff on Sub-drainage District Area

정에 사용된 강우지점의 개수가 많은 QPE2와 QPE4은 QPE1에 비해 변동폭이 최대 1.9배 큰 것으로 나타나, 강우의 공간적 변동성을 잘 표현하고 있는 것으로 평가되었다.

- 3) 강남과 서초 AWS 강우자료와 4가지 QPE 자료를 SWMM 강우입력자료로 사용하여 모의하고 관측 수심과 비교한 결과, QPE4를 입력하였을 때 RMSE가 0.126, REPD가 7.83%로 가장 정확도가 높았으며, 강우량이 과소 산정되는 QPE3의 경우 RMSE가 0.333, REPD가 57.21%로 정확도가 가장 낮게 평가되었다.
- 4) 소매수분구별 침투유출량의 변동폭을 분석한 결과, MAP 분석결과와 유사하게 QPE2와 QPE4의 변동폭이 AWS 지점자료를 적용하였을 때에 비해 최대 6배 큰 것으로 나타나 강우의 공간적 특성이 유출 해석에 반영된 것으로 판단된다.

본 연구결과로부터 수 km 이내의 도시구역에서도 강우의 공간변동성이 클 수 있으며 이로 인해 구역 내 소매수분구별 유출결과에도 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 도시구역면적이 작고 우량계가 많이 않은 경우 단일강우자료를 구역전체에 균일하게 적용하거나 Thiessen 법을 이용하여 강우량을 적용하게 되면 유출해석결과에 상당히 큰 영향을 줄 수 있음을 예상할 수 있다. 향후 도시지역 유출해석 시 적정 강우관측소 수 결정에 대한 연구와 대상지역을 추가하여 결과의 신뢰도를 높이는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 기상청 차세대도시농림융합스마트기상서비스개발(WISE) 사업(KMIPA-2012-0001-1)의 지원으로 수행되었습니다.

Reference

Bedient, P.B., Hoblit, B.C., Gladwell, D.C., and Vieux, B.E. (2000). "NEXRAD radar for flood prediction in Houston." *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, Vol. 5, No. 3, pp. 269-277.

Clarke, B., Kudym, C., and Rindahl, B. (2009). "Gauge-adjusted radar rainfall estimation and basin averaged rainfall for use in local flash flood prediction and runoff modeling." *Proceedings 23rd Conference on Hydrology*,

American Meteorological Society, Phoenix, A.Z.

Kang, N.R., Noh, H.S., Lee, J.S., Lim, S.H., and Kim, H.S. (2013). "Runoff simulation of an urban drainage system using radar rainfall data." *Journal of Wetlands Research, Korean Wetlands Society*, Vol. 15, No. 3, pp. 413-422.

Lee, B.J., Bae, D.H., and Jeong, C.S. (2003) "Runoff Curve Number Estimation for Cover and Treatment Classification of Satellite Image (II): -Application and Verification-." *Journal of Korea Water Resources Association*, KWRA, Vol. 36, No. 6, pp. 999-1012.

National Emergency Management Agency (2011). Annual report of disasters in 2010.

National Emergency Management Agency (2012). Annual report of disasters in 2011.

Noh, H.S., Kang, N.R., Kim, B.S., and Kim, H.S. (2012). "Flood simulation using Vflo and radar rainfall adjustment data by statistical objective analysis." *Journal of Wetlands Research, Korean Wetlands Society*, Vol. 14, No. 2, pp. 243-254.

Park, J.H., Kang, H.S., Lee, G.S., and Lee, E.R. (2007). "Flood runoff analysis using radar rainfall and Vflo model for Namgang dam watershed." *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 10, No. 3, pp. 13-21.

Sinclair, S., and Pegram, G. (2005). "Combining radar and rain gauge rainfall estimates using conditional merging." *Atmospheric Science Letters, Royal Meteorological Society*, Vol. 6, pp. 19-22.

Vieux, B.E., Bedient, P.B., and Mazroi, E. (2005) "Real-time urban runoff simulation using radar rainfall and physics-based distributed modeling for site-specific forecasts." *10th International Conference on Urban Drainage, IAHR/IWA, Copenhagen, Denmark*, Vol. 1, pp. 1-8.

Yoon, S.S., and Bae, D.H. (2013) "Optimal Rainfall Estimation by Considering Elevation at the Han River Basin, South Korea." *Journal of Applied Meteorology and Climatology, American Meteorological Society*, Vol. 52, pp. 802-818.

Yoon, S.S., Bae, D.H., and Choi, Y.J. (2014) "Urban inundation forecasting using predicted radar rainfall: case study." *Journal of Korean Society of Hazard*

Mitigation, Korean Society of Hazard Mitigation,
Vol. 14, No. 3, pp. 117-126.

Yoon, S.S., Lee, B.J., and Choi, Y.J. (2015a) "Deduction of data quality control strategy for high density rain gauge network in Seoul area." *Journal of Korea Water Resources Association, KWRA*. Vol. 48, No. 4, pp. 245-255.

Yoon S.S., Lee, B.J., and Choi, Y.J. (2015b) "Quantitative precipitation estimation using high density rain gauge

network in Seoul area." *Atmosphere, Korean Meteorological Society*, Vol. 25, No. 2, pp. 283-294.

paper number : 15-018

Received : 25 February 2015

Revised : 30 June 2015 / 20 July 2015

Accepted : 20 July 2015