

2014년 8월 25일 부산지역 홍수의 강우, 수문, 수리 분석

JOURNAL OF DISASTER PREVENTION



노 성 진
한국건설기술연구원
수자원연구실 선임연구원



박 희 성
한국건설기술연구원
수자원연구실 수석연구원



황 석 환
한국건설기술연구원
수자원연구실 수석연구원



이 두 한
한국건설기술연구원
하천해안연구실 연구위원

1. 서론

2014년 8월 25일에 발생한 부산·경남지역의 집중호우로 인해 많은 피해가 발생하였다. 8월 24일경 서해에서 발달한 저기압이 남해안을 거쳐 동해 쪽으로 빠져나가면서 8월 25일 부산·경남지역에 집중호우가 쏟아졌으며, 특히 창원과 부산 일대에서 피해가 속출하였다. 인구가 밀집한 부산 금정구의 온천천 유역에서는 집중호우로 인하여 1일 강우량 230mm가 넘는 호우가 발생하였으며, 100~140mm/hr 강우강도가 1시간 이상 연속적으로 관측되기도 하였고, 일부 지점에서는 150mm/hr 이상의 강우강도가 관측되기도 하였다. 이로 인하여 동래역을 비롯한 일부 지하철 역사가 침수되고 인명피해가 발생하였으며, 고리 원자력 발전소가 가동 중단되는 등 심각한 도시 기능마비가 발생하였다.

본 고에서는 2014년 8월 25일 발생한 홍수 피해의 원인이 된 강우 사상에 대해 지상자동관측(AWS; Automatic weather station) 자료와 강우레이더를 통해 분석하고, 침수피해가 발생했던 지역 중 부산의 온천천 유역에 대하여 저류함수모형(Storage function model)을 이용하여 유출량을 추정하고, HEC-RAS 모형을 이용하여 홍수위 분석을 수행하였다.



그림 1. 2014년 8월 25일 부산 홍수 현장 사진

2. AWS 자료를 중심으로 한 강우 분석

2014년 8월 25일 AWS 관측소별로 측정된 일강우량 자료를 기반으로, 내삽기법을 이용하여 공간 분포를 추정하면 다음의 그림 2와 같다. 2014년 8월 25일 호우가 집중된 시간은 13:00~16:00 사이의 3시간으로, 주변의 AWS 관측지점 중 상대적으로 누가강우량이 많은 6개 지점의 누가강우량(그

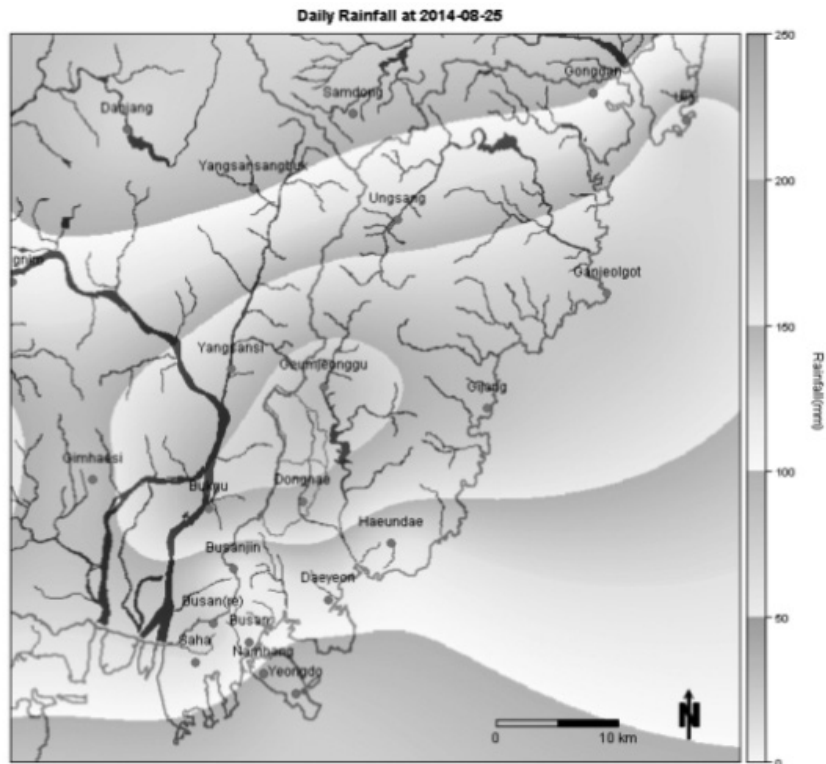


그림 2. 일강우량 분포도(2014년 8월 25일; AWS 일강우량 내삽)

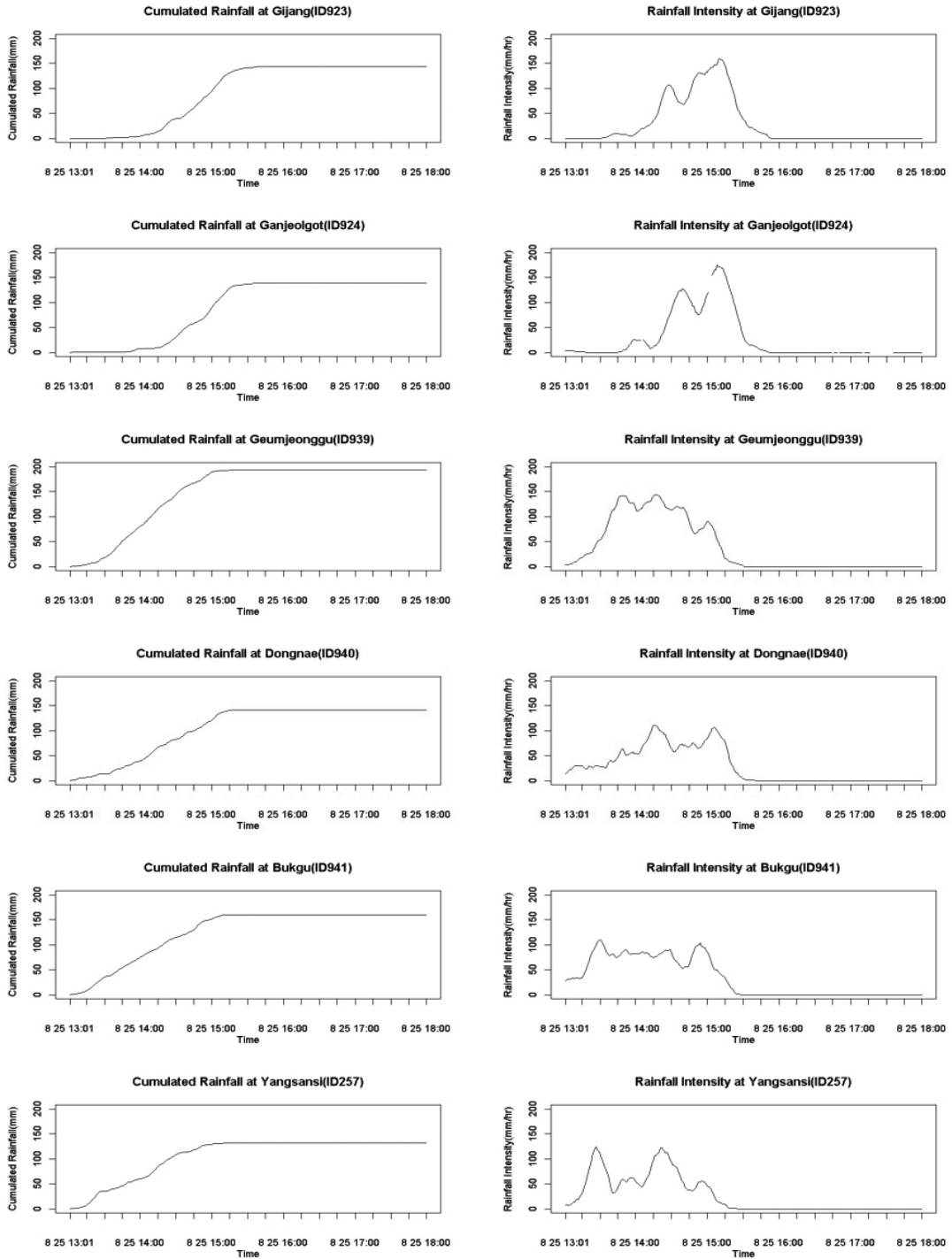


그림 3. 자동지상관측장비 지점별 누가강우량 및 강우강도변화(상위 6개 지점)

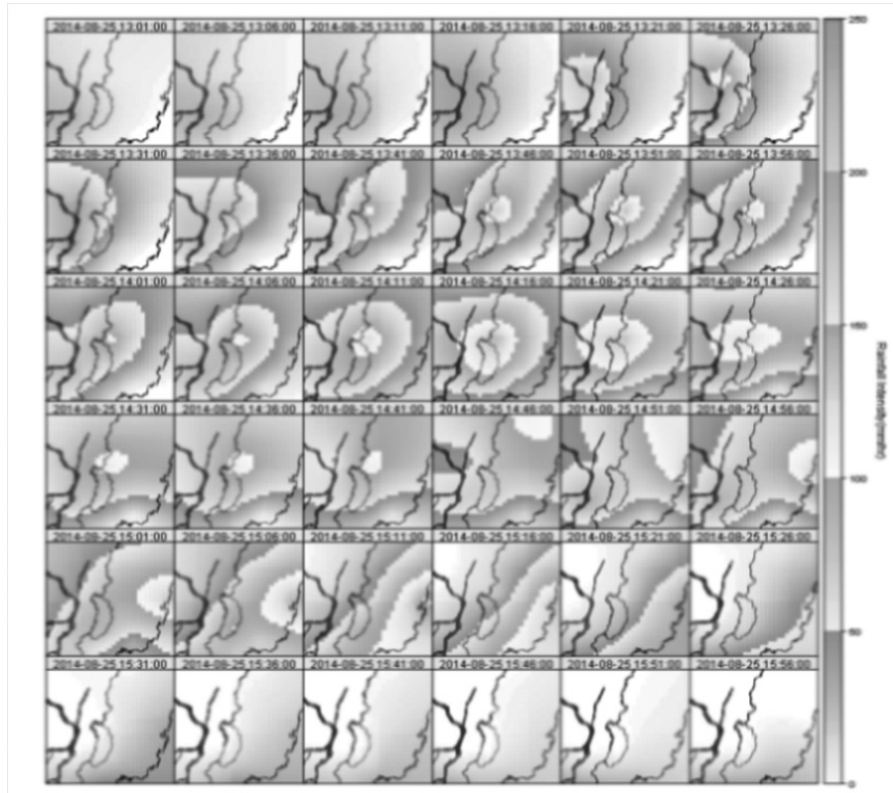


그림 4. 5분 단위 강우공간분포 변화(2014년8월25일 13:00~16:00)

림 3) 및 강우강도 변화(그림 4) 그래프를 통해 시간별 강우 변화를 확인할 수 있다. 그림 3의 6개 관측소에서는 3시간 누가강우량이 100mm를 넘었으며, 특히 금정구 지점은 오후 1시부터 2시간 10분 동안 193.5mm의 강우가 집중된 것으로 관측되었다. 강우강도의 시간 분포는 지역에 따라 차이가 있었으나, 앞의 누가강우량 상위 6개 지점 모두에서 100mm/hr 이상의 강우강도가 관측되었으며, 특히 기장과 간절곶의 2개 지점에서는 순간적으로 150mm/hr 이상의 강우강도가 관측되었다. 금정구 지점에서는 100~140mm/hr의 강우강도가 약 1시간 5분 정도 연속적으로 관측되었으며, 해당 시간동안 평균 130mm/hr의 강우강도를 기록하였다.

그림 4는 2014년 8월 25일 13:00에서 16:00까지 3시간에 대해 1분 단위로 제공되는 AWS의 15분 누가강우량자료를 이용해 시공간적으로 내삽한 것을 5분 단위로 도시한 것이다. 그림에서 보듯이 강우의 생성 및 공간 변화가 매우 급격히 발생하였음을 알 수 있다. 본 고에서는 제한된 지상관측망의 자료를 사용하였기 때문에 호우의 공간적 이동에 대해 정량적으로 평가하기는 어려우나, 2014년 8월 25일 13:27분 금정산 서북쪽 낙동강 부근에서 강한 호우가 발생하였고, 이후 2014년 8월 25일 13:40분 금정산 동쪽 금정구 주위로 강한 호우가 발생하여 1시간 정도 지속되었다가 줄어들었으며

(14시 40분 정도), 이후 기장 지점 부근에서 강력한 호우 중심이 생성되었다가 강우가 동해 쪽으로 이동해 가면서 소멸된 것으로 보인다.

3. AWS 및 강우레이더에 의한 누적강우량 비교

AWS는 점 단위의 관측이기 때문에 강우의 공간분포를 보다 정확히 분석하기 위해 강우레이더 자료와 AWS 자료의 분석을 수행하였다. 본 분석에서 사용한 강우레이더 자료는 지상 우량 보정된 국토교통부 10분 단위 합성강우량 자료(KDP-PPI; 임진강, 소백산, 비슬산)를 이용하였다. 분석기간은 경남 동부지역에 호우가 집중되기 시작한 2014년 8월 25일 7시 30분부터 호우가 종료된 15시 30분까지 선정하였다.

그림 5는 온천천 유역 부근의 AWS와 강우레이더의 누적강우량을 비교한 그림이다. 그림의 세로로 긴 분홍색 선으로 표시된 지역이 온천천 유역이다. 왼쪽 그림이 KMA AWS로 추정된 강우량 공간분포이고 오른쪽이 MOLIT 레이더로 관측된 강우량 공간분포이다. 흰색 점선으로 표시한 지역이 MOLIT 레이더로 관측한 호우 중심부이다. KMA AWS와 MOLIT 레이더 관측치 간에 호우의 깊이와 공간분포 형상이 매우 크게 차이나는 것을 볼 수 있다.

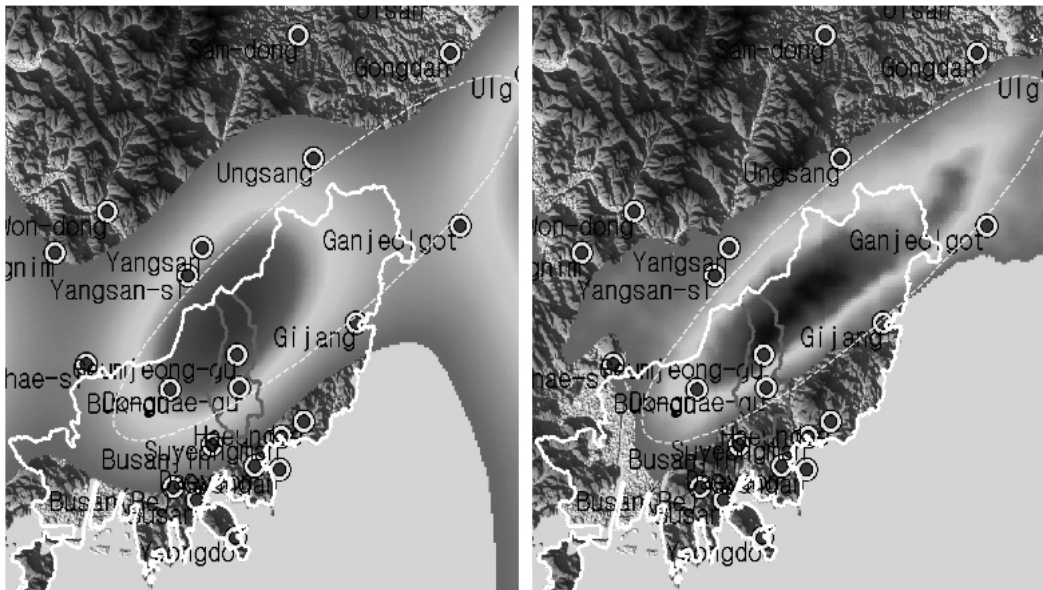


그림 5. 2014년 8월 25일 7시 30분 ~ 15시 30분 (8시간) 온천천 유역 부근 AWS와 국토교통부 레이더 누계강우량 분포 비교 (흰색 실선: 부산시 행정 경계, 핑크색 실선: 온천천 유역 경계)

특히 온천천 상류 지역에서 큰 차이를 보이는데 이는 AWS 관측소의 배치와 매우 밀접한 관계가 있음을 짐작할 수 있다. 흰 점선으로 표시된 레이더 관측 호우 중심부의 우측 중심에서 상단까지 AWS 지점이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. 즉, 우측의 레이더에 비해 좌측의 AWS로 추정된 공간 강우장의 중심부가 아래쪽으로 치우쳐 있고 그 길이 또한 짧게 나타난 것은, 중심부 중상단 지역의 관측지점 부재로 인해 실제 발생한 강우량의 공간 분포를 적절히 관측하지 못하였기 때문일 가능성이 매우 높다.

이러한 비교 결과를 토대로 온천천 상류지역의 강우량은 실제 지상관측망으로 관측된 강우량보다 국지적으로 강우량이 컸고, 분포의 공간규모 또한 넓었을 것으로 추정된다. 우리나라 도심 하도 특성이 상류에 산지가 위치하고 도달시간이 매우 빠른 좁고 협소한 지형이 많다는 점을 고려할 때 효과적인 도시홍수 대응을 위해서는 지상 강우량과 레이더 강우량의 효과적인 융합 활용이 필요할 것으로 판단된다.

4. 온천천 유역 특성

이번에 침수로 인해 큰 피해를 입은 부산 온천천 유역(그림 6)의 개요는 다음과 같다. 온천천은 수영강의 제1지류로 수영강 하구로부터 약 3.1 km 상류지점에서 유입하는 지방하천이며 유역 면적은 56.28 km², 유로 연장은 14.85 km이다. 온천천 유역은 부산광역시 동래구 전부와 금정구의 대부분을 포함하고 있으며 온천천을 따라 부산 도시철도(범어사역~교대역)가 지나고 있어 홍수 발생시 피해가 크게 발생할 수 있는 전형적인 도심하천이다.

하상 경사는 상류로부터 장전교까지 약 1/100, 중류에 해당하는 장전교에서 온천교 지점까지 약 1/300, 온천교에서 수영강 합류점까지 약 1/1,400(부산광역시, 2004)으로 수영강 합류점을 제외한 대부분의 구간에서 경사가 급하다. 금번 2014년 8월 25일 홍수에서도 하류에 속하는 세병교의 수위가 2m에서 6.12m까지 상승하는데 소요된 시간은 1시간 20분에 불과하였다. 도심에 위치한 하천 특성으로 홍수에 대비한 충분한 통수단면 확보에 한계가 있는데 최근까지 여름철 집중 호우 기간에 범람 위기가 자주 발생하고 있다.

5. 온천천 유역 수문 해석

당시 온천천 유역(그림 6)의 유출량을 추정하기 위해 저류함수모형을 적용하였다. 상, 하류 2개의 소유역으로 구분하여 세병교(하류, 면적 20km²) 및 장전교(상류, 면적 19km²) 지점에 대해 유출

을 해석하였으며, 강우 입력자료는 자동지상관측자료를 시공간 내삽한 후, 유역에 포함되는 격자에 대해 면적 평균한 10분 단위 자료를 활용하였다. 모형 보정을 위해 세병교 지점 관측 수위자료 (<http://pnuhydro.pusan.ac.kr>)를 이용하여 수리해석모형(HEC-RAS)에 의해 추정된 유량자료를 활용하였으며, 저류함수의 매개변수 추정에는 Nash-Sutcliffe 모형효율계수를 목적함수로 하여 Harmonic search 방법을 이용하였다. 적용한 매개변수의 범위와 최적화 결과는 표 1 과 같으며 이때 모형효율계수는 0.99정도였다. 매개변수 최적화 결과를 살펴보면 세병교 지점에서 저류함수의 지체시간(TL)은 약 23분 정도로 매우 짧게 나타났다.

2014년 8월 25일 13:00-16:00 까지의 호우사상에 대해 추정된 세병교 및 장전교 지점에서의 수문곡선은 그림 6에서 보는 바와 같으며, 세병교 지점에서 보정된 매개변수를 이용하여 장전교 지점을 유출량을 추정하였으며, 이를 수리 해석의 입력자료로 활용하였다. 추정된 침투홍수량은 세병교 및 장전교에서 각각 638.3, 333.0 m^3/s 였으며, 총 유출체적은 강우량 대비 95% 이상의 유출율을 보였다. 유출해석에 사용한 자료는 두 번째 침투유량으로서 이미 유역이 포화상태이므로 다소 높은 유출율을 보이는 것으로 판단되나, 본 유역에 대한 고수위 유량 관측 자료가 제한적인 관계로 (수리모형에 의해 추정된) 관측유량이 일부 과대산정되었을 가능성이 있다. 또한 앞서 강우레이더에 대한 분석에서 보듯이 온천천 유역 상류 장전교 및 하류 세병교 소유역이 일부 과소산정 되었을 가능성도 있다.

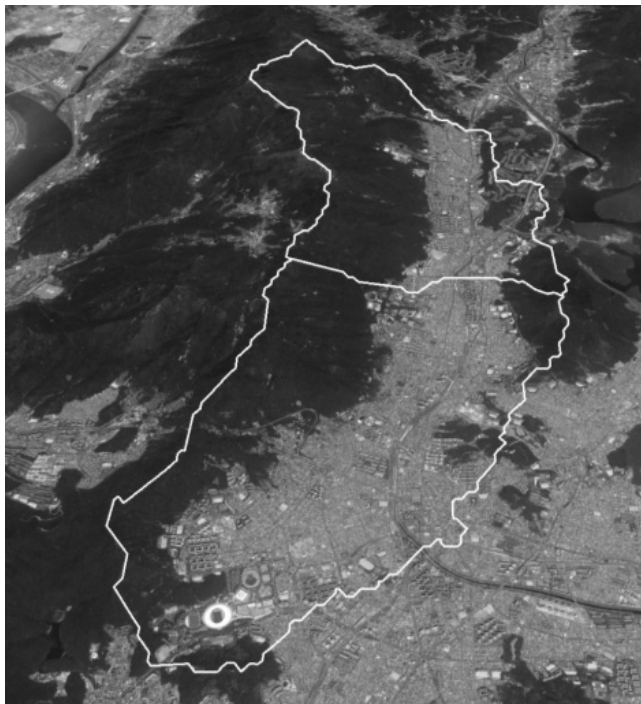


그림 6. 온천천 유역(상류 장전교 및 하류 세병교 소유역)

표 1. 저류함수 모형의 최적화 범위 및 최적값 추정

구분		F1	Fsa	Rsa	K	P	TL
세병교	하한값	0.00	1.00	0.00	0.00	0.50	0.00
	상한값	1.00	1.00	200.00	50.00	0.89	3.00
	최적값	0.99	1.00	150.05	3.53	0.80	0.38
장전교		0.99	1.00	150.05	3.53	0.80	0.18

세병교 유역은 강우 침투가 발생한지 불과 1시간 남짓한 시간에 유량 침투가 도달하는 것을 알 수 있었으며, 상류인 장전교 유역은 이것보다 더 짧은 시간에 침투가 도달하였을 것이므로 사전의 정확한 강우 예측 없이는 홍수 예보나 대피 등이 거의 불가능할 수도 있다는 것을 보여준다. 이러한 현상이 매우 드문 경우로 판단할 수 있지만 최근 들어 자주 발생하는 집중호우는 더 이상 기상이변으로 치부하기 곤란한 수준으로 보인다. 따라서 다양한 관측망을 통한 강우예측 능력의 보완이 필요하며, 과거 자료에만 의존하는 수문 분석에 대해 좀 더 다양한 방법을 강구할 필요가 있다. 또한 설계 기준과 예방시설에 대한 평가 등을 다면적으로 수행하여 대비할 필요가 있을 것으로 판단된다.

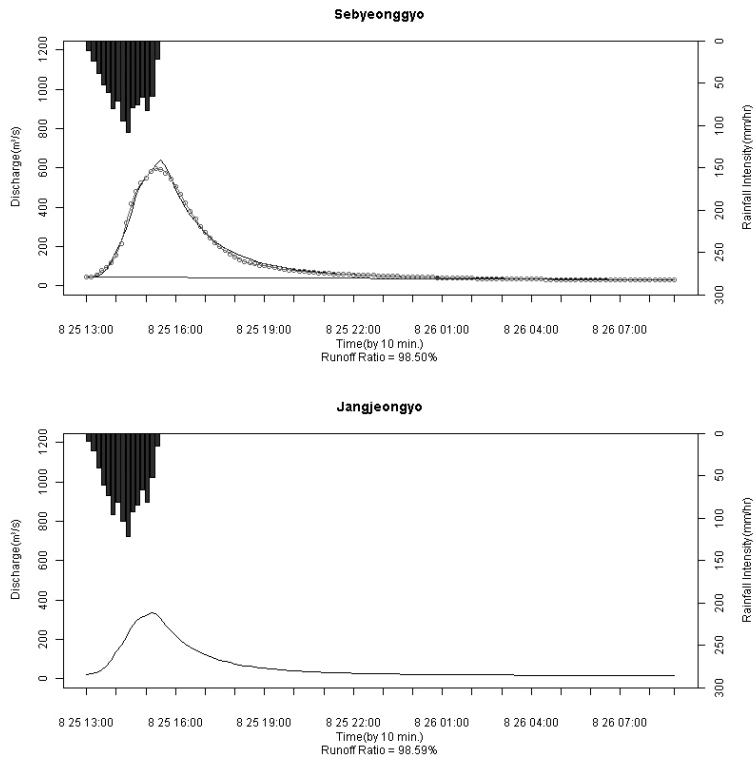


그림 7. 온천천 유역 수문해석 사례

6. 온천천 홍수위 해석

온천천 유역에 대한 유출량 수문해석결과를 토대로 HEC-RAS 부등류 모의를 수행하여 추정된 홍수위는 그림 6과 같으며, 주요 지점의 추정 유량과 홍수량을 2004년 기본계획과 비교하면 표 2와 같다. 표 2에 의하면 최상류 청룡교를 제외한 하류 전 지점에서 추정 홍수량과 홍수위가 2004년 당시의 기본계획 홍수량과 홍수위를 상회하는 것으로 나타났다. 세병교 지점의 수위가 관측 수위에 비해 다소 높게 나타난 점을 고려하면 금번 HEC-RAS 결과가 실제 관측치에 비해 홍수위를 일부 과대하게 산정하고 있음을 알 수 있다. 또한 온천천 유역에서 고유량 관측결과가 없어 보다 정확한 분석이 불가하였지만, 세병교 관측 수위 자체가 설계 홍수위를 상회하고 있음을 고려하면 금번 홍수가 설계 홍수 이상이라는 추정이 가능하다.

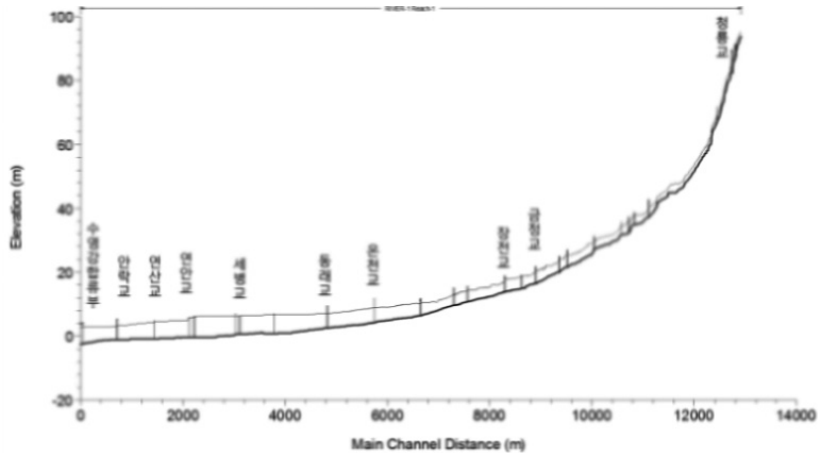


그림 8. HEC-RAS에 의한 8월 25일 온천천 추정 홍수위

표 2. HEC-RAS에 의한 8월 25일 온천천 추정 홍수위 비교

지점	누가 거리 (km)	기본계획(2004)		2014년 8월 홍수	
		계획홍수량 (m ³ /sec)	계획홍수위 (m)	추정 홍수량 (m ³ /sec)	추정 홍수위 (m)
안락교	0.7	594	2.96	770	3.39
연안교	2.2	594	5.14	770	6.05
세병교	3.1	451	5.62	550	6.37
동래교	4.8	355	7.21	401	7.50
장전교	8.3	294	17.31	313	17.85
청룡교	12.7	121	85.19	110	84.96

온천천 하류 부근의 세병교 지점 부정류 모의 결과를 관측 수위와 비교하면 그림 9와 같다. 또한 장전교 하류 구간 시간별 수위 변화 및 주요지점 수위 변화는 그림 10 및 그림 11과 같다. 모의 결과에 의하면 13시에서 14시 사이에 상류 구간인 장전교~동래교 사이의 수위가 상승하기 시작하며 14시에는 15시 사이에 급격한 수위 상승이 발생하여 세병교를 중심으로 상하류의 수위가 최대 수위에 접근하며 이후에는 세병교 상류의 수위는 다소 낮아지면 세병교 하류의 수위가 상승한다. 부정류 모의 구간의 최상류인 장전교의 최대 수위는 15시 10분에 발생하였으며 하류를 따라서 동래교, 세병교, 안락교에서는 10분 간격으로 최대 수위가 발생하였다.

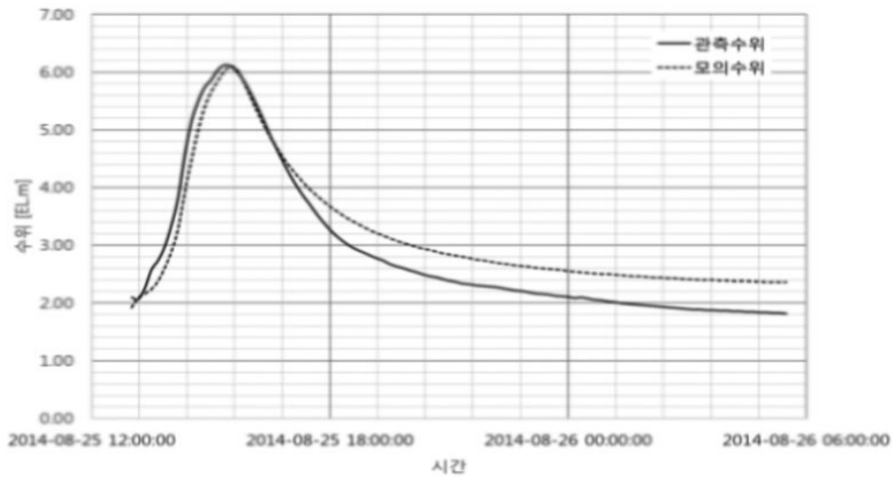


그림 9. HEC-RAS 부정류 모의 결과(세병교 지점)

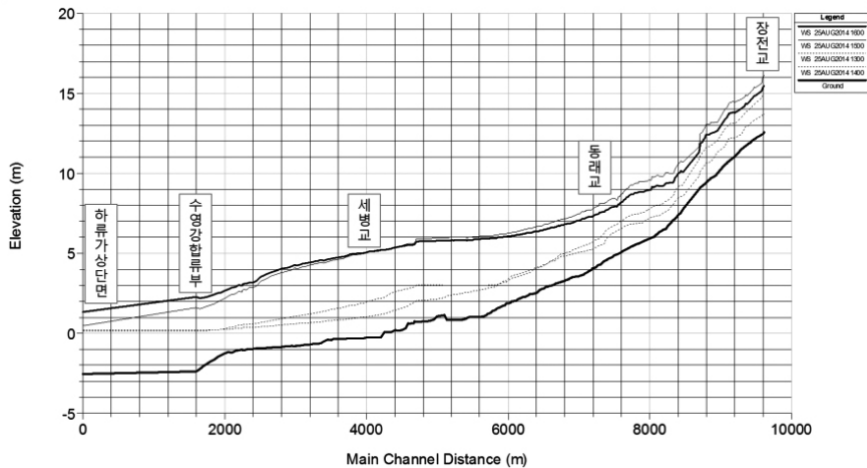


그림 10. 부정류 모의에 의한 장전교 하류 구간 시간별 수위변화

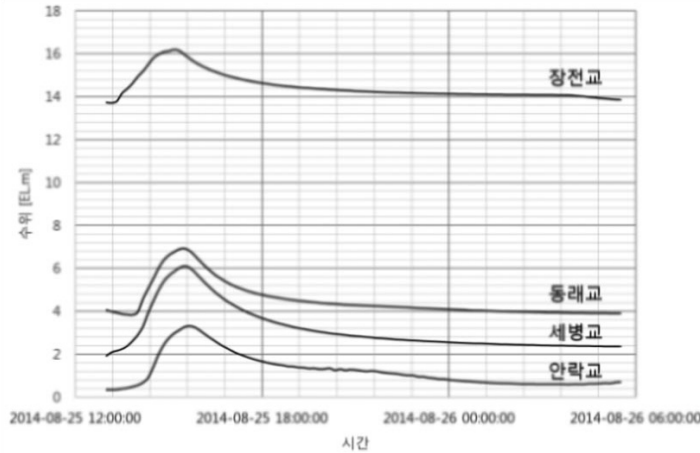


그림 11. 부정류 모의에 의한 주요 지점 수위 변화

제한된 관측자료 및 분석 기간으로 인하여 다양한 가정을 도입하여 분석을 수행하여 실제 홍수 발생 양상과 다소 차이는 있으나 홍수위 부정류 모의 결과는 도달시간이 매우 짧은 도시 홍수의 특성을 반영하고 있음을 알 수 있다. 세병교 지점의 관측자료에 의하면 이번 홍수는 설계 홍수 이상으로 추정되며 최고 수위 도달 시간도 2시간 이내로 홍수의 하류 전파 시간도 매우 짧은 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 온천천은 국내 도시 하천이 가진 하천관리 측면에서의 취약성을 잘 보여주고 있는 사례라 판단된다. 수리학적 측면에서 이에 대응하기 위해서는 도달 시간이 짧은 도시홍수에 대응할 수 있는 관측 및 예보 체계의 재정비가 필요할 것으로 보인다.

7. 마치며

2014년 8월 25일 부산일대에서 발생한 집중호우의 특성을 레이더 관측자료를 이용하여 분석하여 보았다. 특히 부산 온천천 유역의 돌발성 홍수를 유발한 호우는 2시간 남짓 집중된 호우에 의해 유발되었다고 볼 수 있다. 온천천 유역과 같은 경우 도심지면서 남북방향으로 길고 고도차가 심하며 동서방향으로 협소한 홍수에 매우 취약한 지형적 조건을 갖고 있다고 볼 수 있다. 이러한 지역의 경우는 호우가 발생하였을 경우 침투 도달시간이 매우 짧은 홍수를 유발하기 때문에 발생 시 대응에 매우 어려움에 봉착하게 된다. 더욱이 도심지 위주로 설치된 관측망으로 인해 상류 고지대 호우상황의 정확한 파악이 어려워 홍수해석 및 예측에 큰 불확실성이 존재하게 된다. 또한 온천천 유역의 1시간 정도의 빠른 수문 응답속도는 선행 예보시간이 부족한 어려움을 여실히 드러낸다. 또한 중소규모의 도시 하천은 인명, 재산, 시설 등의 집중으로 홍수 발생시 피해가 극심하지만, 계측 및 관측이

적절하게 지원되지 않아 자료 불확실성이 큰 편이다. 최근 도심지의 집중호우가 더 이상 이번으로 받아들이기 힘들 정도로 빈번하게 일어나고 있는 실정이므로 이에 대응할 수 있는 예보 및 관측 시스템의 정비가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 다양한 관측망을 이용해 강우예측 능력을 보완해 나가야 할 것이며, 설계 기준과 예방시설에 대한 평가 등을 다면적으로 수행하여 대비할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 원고는 한국건설기술연구원 주요사업 '도심 홍수 공간해석 및 예방시설평가 기술 개발'의 연구비 지원으로 작성되었습니다. 본 고의 내용은 수자원학회지 '물과 미래' 10월호에 필자들이 게재한 기사와 일부 중복됨을 밝힙니다.

