도시홍수예보 시행을 위한 고속예측기술 개발

김형준 KICT 수자원하천연구본부 수석연구원
심상보 KICT 수자원하천연구본부 박사후연구원

들어가며

최근 기후변화의 영향으로 강우의 지속시간 및 공간적인 집중화가 가속되면서 그동안 겪어보지 못한 규모의 홍수피해가 자주 발생하고 있다. 2020년 장기간의 장마로 인하여 우리나라 전역에서 홍수피해가 발생하였으며, 일부 지역에서는 계획홍수량을 초과하는 홍수가 발생하여 대규모 인명 및 재산 피해가 발생하였다. 2022년에는 서울시 남부에 발생한 집중호우로 인하여 도시의 내수배제시설의 능력을 초과하는 홍수가 발생하여 도시지역 곳곳이 침수되었으며, 지하공간에 거주하는 인구가 많은 관악구 일대에서는 인명피해가 발생하기도 하였다.

이와 같이 예상을 초과하는 강우사상이 발생하는 경우는 계속해서 증가할 것으로 예상된다. 특히, 불투수 지역의 비율이 높은 도시지역의 경우 국지적인 집중호우에 의한 침수피해를 겪게 될 위험성이 높아지고 있으며, 앞으로 그 위험성은 더욱 커질 것으로 예상된다. 이에 대한 대책으로 환경부는 최근 발생한 대규모 홍수피해 경험을 바탕으로 홍수예보 영역을 확대하기 위하여 하천의 홍수특보지점을 추가로 지정하고 있으며, 새로운 법을 제정하여 도시지역에 대한 홍수예보를 실시할 제도적 근거를 마련하였다. 한국건설기술연구원에서는 환경부의 도시지역 홍수예보 시행을 지원하기 위한 도시홍수예보 모형을 개발하고 있다.

실시간 도시홍수예측 모형의 개발

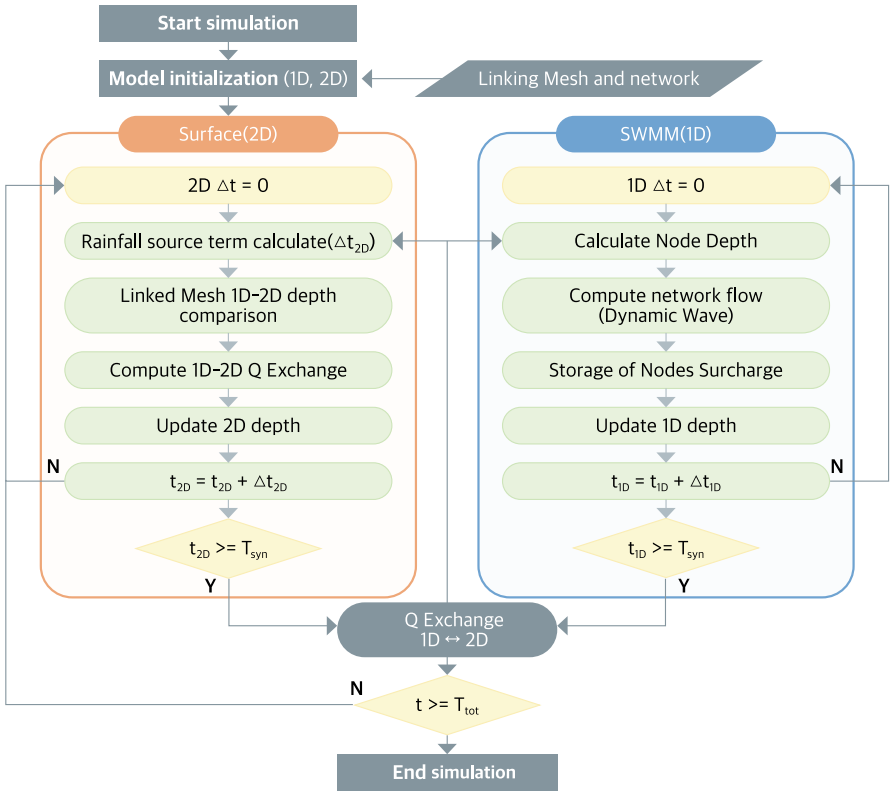
1. 도시홍수 예측을 위한 이중배수모형

집중호우로 인한 도시의 침수현상을 해석하기 위해서는 강우가 지표면에 내린 후 거동 현상을 해석하는 2차원 모형과 지하에 설치되어 있는 복잡한 우수관망 내의 흐름을 해석할 수 있는 1차원 모형이 필요하다. 도심지 침수해석에 활용되는 오래된 방법은 1차원 우수관망 흐름해석을 수행한 후, 관망에서 배제된 유량을 산정하여 도시의 지표면으로 배출된 유량을 2차원 모형에 적용하여 침수범위를 해석하는 방법이었다. 이와 같은 방법은 지표면으로 배제된 유량이 다시 우수관망으로 재유입될 수 있는 현상을 반영하지 못하여 침수면적을 과다하게 산정할 가능성이 있다. 최근에는 우수관망 흐름해석 모형과 지표수 흐름해석 모형을 동적으로 연계함으로써, 우수가 관망으로 유입되고, 우수관망의 능력을 초과하는 유량에 의한 침수과정과 지표면에 잔류한 우수가 다시 관망으로 유입되어 침수가 해소되는 과정을 모의할 수 있는 알고리즘을 적용한 모형 개발이 이루어지고 있다.

한국건설기술연구원 수자원하천연구본부에서는 강우-지표수 흐름-우수관망 흐름을 동시에 해석할 수 있는 HC-SURF(Hyper Connected Solution for Urban Flood) 모형을 개발하였다. 우수관망 흐름 해석에는 가장 일반적으로 사용되는 미국 환경보호청(EPA)의 SWMM(Storm Water Management Model) 5.2 버전의 소스 코드를 사용하였으며, 지표수 흐름해석에는 2차원 천수방정식을 유한체적법으로 이산화한 자체 개발코드를 이용하였다. SWMM 모형은 C언어로 작성되어 있고, 지표수 흐름은 Fortran 언어로 개발되었으며, Visual Studio 내에서 하나의 프로젝트로 구성하여 서로 정보를 교환할 수 있도록 구성한 후 하나의 실행파일로 제작되었다.

HC-SURF 모델은 도심지의 우수 거동을 분석하기 위하여 우수관망과 지표수의 흐름모의를 수행하는 기법의 결과를 서로 공유함으로써 도시홍수를 해석할 수 있도록 설계되어 있다. 우수관망으로 유입되는 유량의 산정은 SWMM 모형의 집체형 강우유출모의 결과를 이용하여 순차적으로 우수관망 흐름모의에서 지표수흐름 흐름모의로 연결되거나, 분포형 강우를 이용하여 지표수 모의를 수행하고 우수관망의 유입유량을 계산한 후 지표수 결과와 비교하여 잉여유량 및 재유입 유

[그림 1] HC-Surf 모형의 도시홍수 모의 흐름도

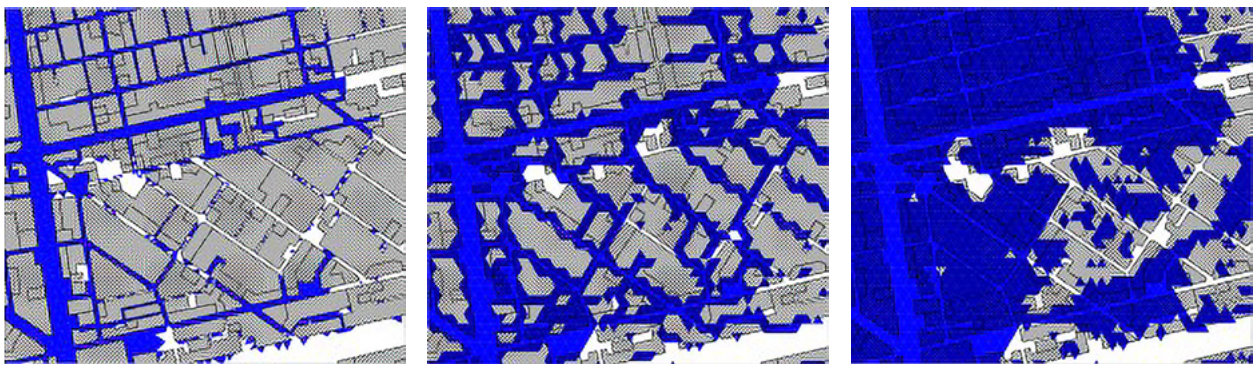


량을 산정할 수 있는 방법이 각각 모형에 반영되어 있다.

2. 효과적인 도시 내 건물 형상반영

도시지역에 대하여 강우유출과 지표수 거동에 대한 해석을 기반으로 홍수예측을 수행하기 위해서는 하천과 달리 도심지 내의 건물과 도로 등 다양한 시설이 흐름에 미치는 영향을 반영하는 것이 중요하다. 도시홍수 해석 시 건물의 영향을 수치격자에 반영하는 방법으로는 (a) 계산 영역에서 건물을 제외하는 방법, (b) 수치격자 내에 건물이 차지하는 비율을 산정하여 유효면적을 지배방정식에 반영하는 방법, (c) 건물이 포함되는 영역의 격자에 높은 값의 조도계수를 적용하여 흐름의 유속 및 방향을 제어하는 방법 등이 있다. 도시홍수예보를 위한 효율적인 수치해석 모형을 개발하기 위하여 건축물을 모형에 반영하는 방법에 따른 결과의 차이에 대한 연구를 수행하였다. 2022년 대규모 도시홍수가 발

[그림 2] 건물반영기법에 따른 도시홍수 모의 결과



(a) 건물영역 배제 격자 (b) 건물 비율 반영 (c) 수정 조도계수

[표 1] 병렬처리기법 적용에 따른 도시홍수 계산효율 향상

No. of Threads	건물영역 배제 격자		수정 조도계수		건물 비율 반영	
	Cal. Time (sec)	Speed Up $Time_1^{Cal}/Time$	Cal. Time (sec)	Speed Up $Time_1^{Cal}/Time$	Cal. Time (sec)	Speed Up $Time_1^{Cal}/Time$
1	61,138.90	100.00%	17,404.12	100.00%	28,833.92	100.00%
2	37,032.58	60.57%	10,835.19	62.26%	17,281.06	59.93%
4	28,383.98	46.43%	6,241.79	35.86%	12,301.98	42.66%
6	22,828.21	37.34%	6,052.16	34.77%	9,653.81	33.48%
8	19,952.40	32.63%	5,338.91	30.68%	8,912.67	30.91%
10	20,840.64	34.09%	4,781.47	27.47%	7,969.42	27.64%

생한 도림천의 신대방역 인근 지역에 대하여 모형을 적용하여 그 결과를 그림 2와 같이 비교하였다.

그림 2(a)는 건축물을 수치격자에서 배제하고 침수범위를 모의한 결과이다. 도로 형상을 매우 정밀하게 반영하고 있음을 확인할 수 있지만, 격자 생성 시 정확하게 반영하지 못한 공간에 대해서는 수치모의 영역에서 배제되어 실제 침수가 발생할 수 있는 공간을 모의에서 배제하게 되는 문제점이 있다. 건물이 수치격자에 차지하는 비율을 반영하여 도시홍수를 모의한 결과를 그림 2(b)에 나타내었다. 수치모의 결과, 계산영역을 표현하는 격자의 형상에 관계없이 도시홍수를 모의하였지만, 도로를 통하여 침수가 발생하는 현상을 합리적으로 모의하고 있음을 확인할 수 있다. 건축물이 많은 지역은 침수심이 산정되지 않았으며, 우수가 유하할 수 있는 공간이 많은 격자를 중심으로 도시홍수를 모의할 수 있다.

수정 조도계수를 이용하여 도시홍수 범람모의를 한 결과를 그림 2(c)에 나타내었다. 건축물이 있는 공간에 조도계수를 증가시켜 우수흐름의 저항을 크게 설정하였지만, 실제 건축물이 있는 공간으로 우수흐름이 발생한다. 그와 같은 결과로 도시홍수 면적이 3가지 모의 조건 중에서 가장 넓게 형성되는 것을 확인할 수 있다.

3. 병렬처리기법 도입을 통한 실시간 예측성능 구현

도시홍수예보 시행을 위해서는 모의수행을 최소한으로 단축하여 업무효율을 향상할 필요가 있다. HC-SURF 모형은 병렬처리기법을 적용하여 계산효율을 향상함으로써 실시간 도시홍수예보가 가능하도록 구축되었다. 표 1은 각 조건에 병렬처리기법을 도입하여 산출한 계산소요시간이다.

건물 형상을 반영하여 수치격자를 생성한 경우에는 병렬처리기법을 적용하였음에도 불구하고, 아주 작은 면적을 갖는 계산격자에 의하여 계산시간 간격이 결정되기 때문에 계산시간을 단축했음에도 다른 기법보다 오랜 계산시간이 요구된다. 균일한 계산격자를 활용하여 건물의 영향을 반영한 수치모의에서는 계산시간의 단축비율도 높을 뿐만 아니라 계산시간도 매우 적게 필요한 것을 확인할 수 있다.

실증시험을 통한 현업화 추진

환경부는 2022년 도림천 유역에 발생한 대규모 도시홍수 이후 '도시하천유역 침수방지대책법'을 제정하고, 홍수예보 대상영역을 확대하기 위한 제도적 기반을 마련하였다. 이후, 도림천을 대상으로 시나리오 기반의 도시홍수지도를 유관기관에 제공하는 기술을 구축하였으나, 실시간 수문현황을 반영하여 정확한 도시홍수 정보를 제공하기에는 기술적으로 미흡한 부분이 많이 있다.

HC-SURF 모형은 개발 초기단계부터 환경부의 도시홍수예보 지원을 위하여 기능 및 성능이 설계되었으며, 2022년부터 2024년까지 3년간의 연구개발을 통하여 기본적인 성능을 구현하였다. 2025년부터는 환경부 한강홍수통제소의 「댐-하천 디지털트윈」 운영 서버 내에서 실증실험을 계획하고 있으며, 3월부터는 환경부 수문조사 데이터베이스와 실시간 연계체계를 구축하여 협업의 지원을 위한 모형의 고도화를 추진할 계획이다. 앞으로 2년 남은 연구 개발 기간 동안 수요자인 환경부의 의견을 반영한 HC-SURF 모형의 고도화를 완료하여 향후 우리나라 고유의 기술로 도시홍수예보가 실시될 수 있는 기틀이 마련될 수 있을 것으로 기대된다. KICT