



최 성 열

한국방재협회 이사  
방재안전기술원 대표  
sixbong777@gmail.com

JOURNAL OF DISASTER PREVENTION

# 도시홍수방어를 위한 지상·지하 공간 통합침수해석모형(UFAM<sup>1)</sup>)

## 1. 개발의 배경

최근 전세계 규모의 이상기후 빈발 및 재난환경변화로 인한 태풍, 호우와 관련된 도시역의 홍수침수는 과거보다 규모가 커지고 있으며, 또한 호우의 국지성 등으로 인해 예측하기 힘들어지고 있는 상황이다.

우리나라에서 발생한 격심한 홍수재해로는 5조가 넘는 피해를 유발한 2002년 태풍 “루사”를 들 수 있으며, 그 외에도 2004년 태풍 “매기” 등과 같은 재난이 끊이지 않고 발생하여, 연간 129명의 희생자가 나오고 있으며, 이를 피해액으로 환산하면 연간 1조 2,900억의 손실이 발생하고 있다. 이렇듯 우리나라 도시역에서 발생하고 있는 재난환경의 변화를 살펴보면, 도시화증가율이 매우 급격하게 증가 하고 있으며, 집중호우 발생횟수도 과거에 비해 현저히 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 지하공간의 활용은 도시의 거대화에 반드시 수반되어 도시홍수침수에 대한 위험성은 날로 증가하고 있는 것에 반해, 강우량은 기후변화로 인해 더욱 커 질 것으로 예측되고 있다.

또한, 최근 몇 년간 서울, 부산, 인천 등 우리나라 광역대도시에서는 기후변화 및 도시화에 따른 국지성 게릴라성 호우의 증가로 지상공간의 침수피해가 급증하고 있으며, 뿐만 아니라 최근 대형화되는 지하공간에서도 많은 침수피해가 발생하고 있어, 사회 라이프라인에 큰 불편을 초래하고 있다.

특히 2010년, 2011년에 광화문, 강남역 사거리, 대치역 사거리 등에서 발생한 홍수침수를 살펴보면, 도시기능이 거의 마비되는 상황이 발생했으며, 비록 지하공간 자체의 침수는 미미하여 인명사고는 발생하지 않았으나, 그 위험성 자체에 대한 경각심은 더욱 커졌다고 할 수 있다.

특히 우려가 되는 것은 지하공간에 위치하는 이용자들이 지상의 침수상황을 인식하는 것이 매우 어렵다는 점에 반해, 지하공간의 침수는 지상공간의 침수상황에 따라 매우 빠르게 확산되어 나간다

1) UFAM : Urban Flood Analysis Model로서 국립재난안전연구원의 관련 연구로 개발되었으며 도시 지상공간 및 지하공간을 통합하여 지표 강우유출, 우수관망 유출 그리고 지하공간 침수과정을 통합하여 모의 할 수 있는 모형

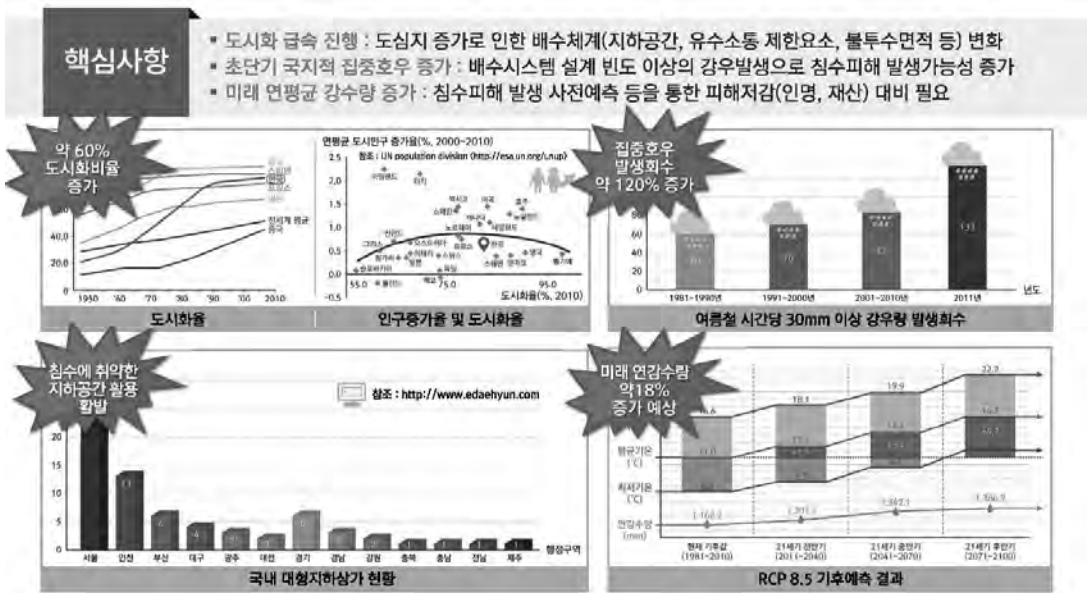


그림 1. 도시홍수침수를 둘러싼 재난환경의 변화



그림 2. 최근 도시에서의 홍수침수 사례

는 점이며, 그렇기 때문에 지상공간에서의 침수상황은 그다지 심각하지 않은 상황에서도 지하공간의 침수는 매우 위급할 수 있다는 점이다.

결국 지상공간에서는 도보가 가능한 침수심, 예로서 50cm 정도의 침수심으로 주민의 대피가 어는 정도 가능한 상황이어서 이에 따른 지하공간의 대피에 소홀할 수 있으나, 실제로 해당 지상 침수 심 상황에서는 지하공간에서의 대피는 거의 불가능하게 된다는 것이다. 즉 지상공간 및 지하공간에

서의 대피에 대한 경보의 발령기준시간 혹은 대피한계기준시간<sup>2)</sup> 등에 있어서 상이한 시간축을 갖는다고 할 수 있으므로, 지하공간에서의 대피를 위해서는 지상침수에 따른 대피경보 발령 보다 상당히 앞선 대피 발령이 필요하다.

이러한 의미에서 지상 및 지하로 구성된 도시공간의 침수예측 및 실시간 예경보를 위해 통합적이면서, 실무에 활용 가능한 지상-지하 통합침수해석모형 개발이 시급한 실정이나, 현재 우리나라에서 활용되고 있는 도시지역의 침수예측기법 및 기존의 연구 성과들을 살펴보면, [지표면 범람수 해석]⇔[우수관망 해석]⇔[지하공간침수해석]의 상호 과정 중, 특히 지상공간과 지하공간을 통합·연계하고 있지 못하고 있어, 따라서 지하공간에 대한 실질적인 예경보 체계를 구축할 수 있는 요소기술(지하공간침수해석기술)이 개발되어 있지 않다고 볼 수 있다.

따라서 향후 기후변화와 도시화에 대응하여 침수재난에 강한 도시공간을 조성하기 위해서는 보다 근원적이고 지속가능한 관점에서 도시지역의 지상-지하공간 특성을 감안한 공간별 침수예측모형의 개발 및 통합모형 구축이 필요 할 것이다.

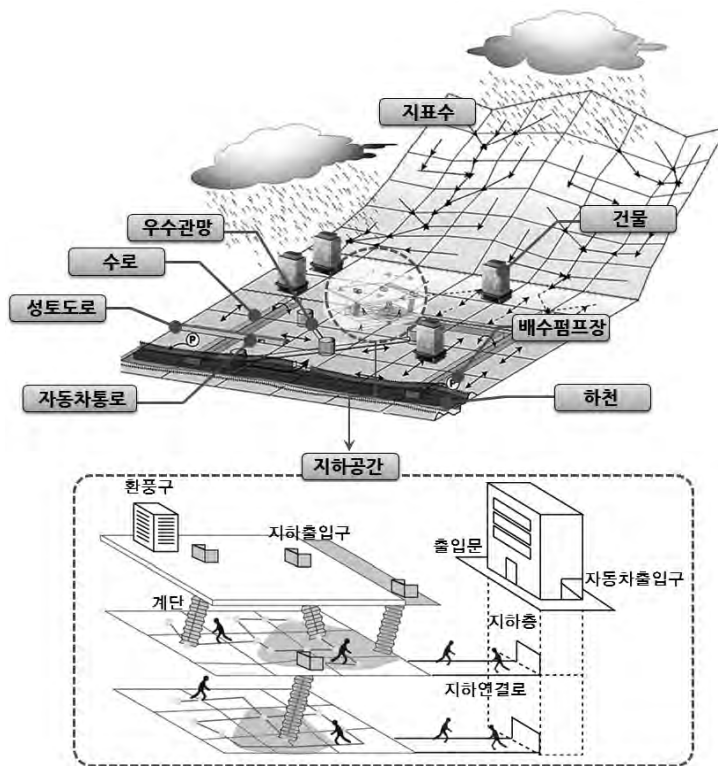


그림 3. 지상·지하공간 통합침수예측모형의 개념도

2) 대피한계기준시간 : 지하공간에서 이 시간 이후에는 대피가 불가능하게 되는 시간으로서 같은 지하공간이라도 대피가 시작되는 위치에 따라 모두 다른 값을 갖는다.

## 2. UFAM의 이론

### 2.1 지상·지하공간 통합침수예측모형의 개념

본 모형은 도시역에 내리는 강우가 지표 경사를 따라 흘러내려가면서 우수 빗물받이를 경유하여 우수관망으로 유입되어 우수관망흐름이 발생하게 되며, 빗물받이로 유입이 안된 우수는 그대로 지표 혹은 도로 경사를 따라 하류로 유하하게 된다. 반대로 우수관망에서 범람된 범람수는 다시 지표 경사에 따라 지표 범람흐름을 유발하게 되도록 모형이 구축되어 있다. 또한 이상의 과정에서 지상에 발생하는 지표 침수심 보다 낮은 지하공간 유입구가 있다면 이를 경유하여 지하공간의 침수가 발생하게 되는데 이를 지하공간 침수해석모형을 통하여 모의하게 된다.

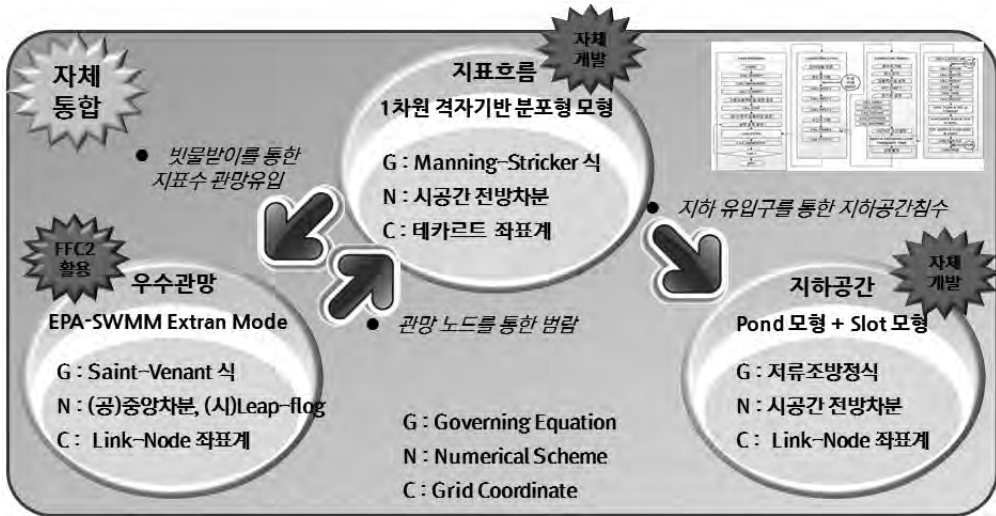


그림 4. 지상·지하공간 통합침수예측모형의 구성

### 2.2 지상·지하공간 통합침수예측모형의 구성

본 모형은 크게 지상공간 모형과 지하공간 모형으로 구성되어 있으며, 지상공간모형은 지표흐름 모형과 우수관망모형으로 구성되어 있다.

#### ■ 지표수 거동 모형

지표수 거동모형은 지표의 흐름을 해석하기 위한 것으로 본 모형에서는 지표의 흐름을 수위기반으로 발행시키기 위해서 격자기반의 분포형 모형을 활용하고 있다. 격자기반의 분포형 모형은 유역

의 지표유출량 및 지표흐름을 해석하기 위해 활용되고 있으나 통상적으로는 유역의 유출구 지점에서의 유출량을 경험공식 등을 활용하여 산정하고 이러한 유출량을 가장 낮은 지반고를 갖는 하위 격자로 보내는 방법을 활용하게 되나, 이러한 방법으로는 도시역에서 발행하는 침수과정을 재현하는데 한계가 있다. 따라서 본 모형에서는 도로를 따라 발생하는 흐름, 저지대에서 범람된 유량이 낮은 수위를 갖는 격자로 발생하는 흐름 등을 해석하기 위해 격자간 수위의 차로 흐름을 발생시키기 위해 분산방정식의 일종인 Manning- Stricker 방정식을 기본으로 하여 격자간 차분방정식을 구성하고, 시간축으로는 전방차분을 통해 이산화방정식을 구성하고 있다. 또한 이러한 방정식은 향후 제시될 각종 수치정보와의 정합성을 담보하기 위해 테카르트 좌표계에 적용하여 활용하게 된다.

### ■ 우수관망 거동 모형

지표흐름해석과정에서 발생하는 지상의 침수량을 우수관망으로 연계하기 위해서 빗물받이 개념을 도입, 즉 지상 우수를 빗물받이를 경유하여 우수관망으로 연계하는 방법을 활용하고 있다. 또한 우수관망 해석은 미국 EPA가 개발한 SWMM의 Extran Block Mode를 활용하고 있다. 우수관망 모형의 기본방정식은 Saint-Venant 식을 사용하고 있으며, 차분기법으로는 공간방향으로는 중앙차분법, 시간방향으로는 Leap Flog 법을 사용하며, 좌표계는 관망의 절점을 노드로 형상화 하고 해당 관을 링크로 구현하는 Link-Node 좌표계를 활용하고 있다. 통상적으로 활용되고 있는 상용모형에서는 지표의 소유역에서의 유출을 관망의 노드에 유입시키는 방법을 채택하고 있으나, 본 모형에서는 소유역 내에 산재한 다수의 빗물받이를 관망으로의 유입구로 구현하고 있는 것이 기존 상용모형과의 차별성이라 할 수 있다. 따라서 기존 상용모형에서의 지표 범람해석은 소유역 노드에서 범람한 우수를 지표 2차원 흐름모형을 활용하여 모의 하고 있는 관계로 소유역 내에 위치한 도로 등에서 관망으로 유입되지 못한 우수가 도로 등을 따라 하류로 유하하는 현상을 모의 할 수 없으나 본 모형에서는 도로에 연한 빗물받이를 모의에 활용함으로써 도로를 따라 유하하면서 저지대로 침수가 가중되는 현상을 모의 할 수 있는 특징을 갖는다.

### ■ 지하공간 침수거동 모형

지하공간에서 발생하는 침수과정을 모의하기 위해 본 모형에서는 지하공간의 가상적인 공간을 하나의 가상 저류조로 구현하고, 이러한 여러 저류조 사이를 가상관으로 연결하는 저류조 방정식을 활용하고 있다. 이러한 방법은 일본의 이노우에 등이 개발한 것으로 복잡한 지하공간을 가상의 저류조로 단순 형상화 함으로서 개념적으로 매우 이해하기 쉬운 장점이 있다.

물론 아주 복잡한 지하공간을 매우 간단하게 모형화 하기 때문에 정확성 면에서는 아쉬운 점이 있을 수 있으나, 모형의 활용성인 측면, 즉 지하공간의 실시간 예경보라는 측면에서 살펴보면 매우 적절한 모형으로 판단된다. 정확성만을 강조한다면 지하공간을 3차원 Navier- Stocks 방정식계를 활

용하여 모의하는 것이 가장 바람직하나, 이러한 접근 방법은 모의에 걸리는 시간적 제약으로 예경보 시스템을 구축함에 있어서는 바람직하지 못한 것은 기지의 사실이다.

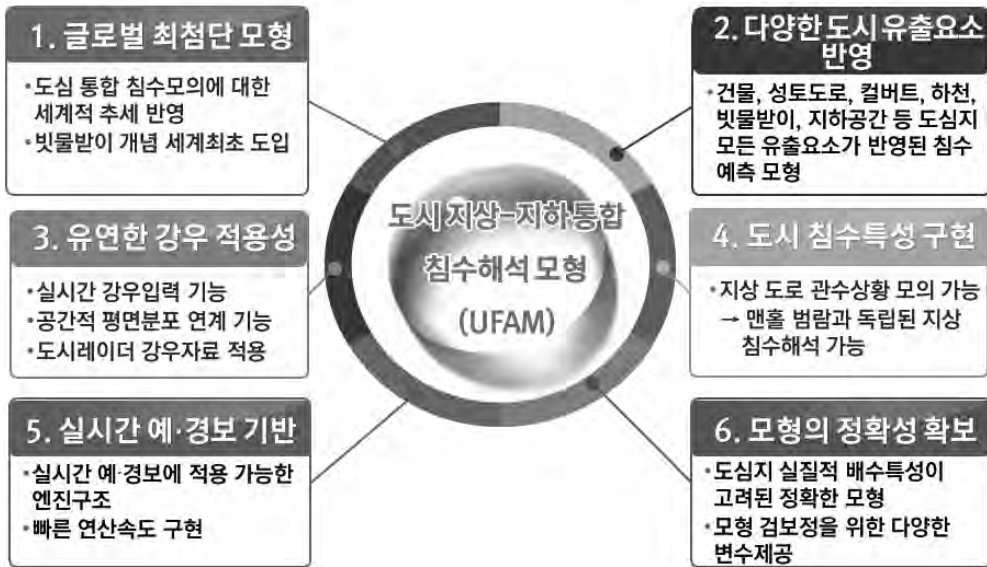


그림 5. UFAM 모형의 특징점

### 3. UFAM의 특징점

UFAM은 개발에 있어서 기존의 도시홍수침수과정 및 원인을 밝힐 수 있도록 기존의 상용모형에서는 고려할 수 없었던 여러 가지 개발요소를 반영하고 있다. 그러한 의도에서 본 모형은 여러 가지 면에서 특징점을 가지고 있으며, 이를 요약하면 다음과 같다.

#### 3.1 글로벌 최첨단 모형

최근 선진국에서 도시홍수침수를 분석하기 위해 개발하는 모형은 대부분 산지, 도시, 지상, 관망, 지하하는 요소를 통합적으로 연계하는 추세라 할 수 있다. 그러한 의미에서 UFAM은 국내 유일의 모형일 뿐만 아니라, 상술한 의미에서 국제적인 추세에 충실히 따라가고 있는 글로벌 최첨단 모형이라 할 수 있으며, 특히 지표공간과 우수관망의 연계를 위해 빗물받이 하는 요소를 도입한 점은 세계적으로도 예를 찾기 어려운 선진 모형이라 할 수 있다.

이러한 빗물받이를 연계요소로 활용하고 있는 이유는 도시 지형구조가 대체로 산지, 구릉성 언덕, 평지 등으로 구성되어, 도시홍수침수의 발생원인이 소유역의 유출구 지점에서의 노드 범람에 의해서 일어나는 것 이외에도 소유역 내에서의 빗물받이 부근에서 유입되지 못한 우수들의 흐름으로 발생하는 범람을 해석할 수 있어야 하는 우리나라의 독특한 도시 지형 구조 때문이라 할 수 있다.

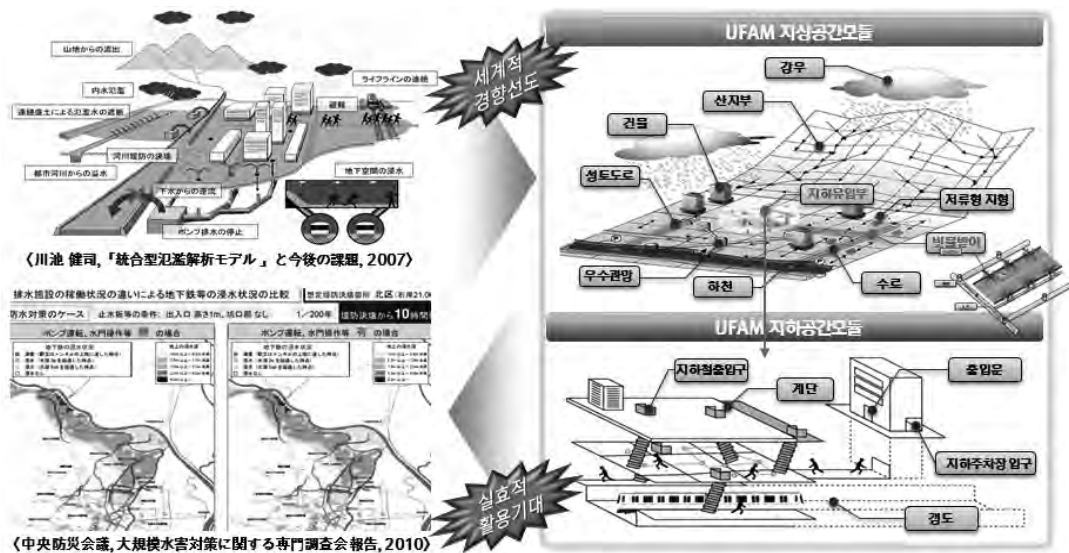


그림 6. 도시역 홍수침수해석모형에 대한 세계적인 통합·연계 흐름

### 3.2 다양한 도시유출 영향 요소 반영

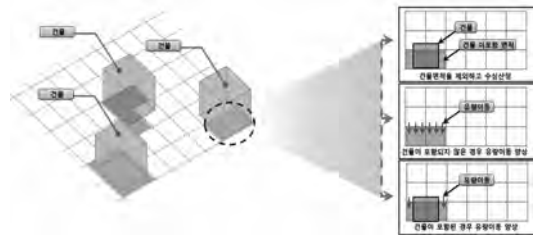
도시홍수침수를 해석하기 위해서는 강우가 내리고 이 강우가 지표의 각종 구조물의 영향을 받으면서 저지대로 유하해 가면, 이러한 지표흐름 과정에서 빗물받이를 통해 우수관망으로 유입되고, 이들이 최종적으로는 수문이나 펌프 등을 경유하여 하천이나 바다로 유하해 가는 과정을 모의 해야 한다. 또한 그러한 과정에서 지상의 침수심으로 인해 지하공간이 침수를 격게 되는 경우에는 해당 지하공간에서의 침수과정도 동시에 모의해야 한다.

즉 도시에 내린 강우를 최종 배수역까지 추적하기 위한 모형은 크게 강우 부분, 지상 부분, 관망 부분 및 지하침수 부분으로 구성되어야 하며, 해당 부분은 여러 가지 요소로 구성되어야 한다.

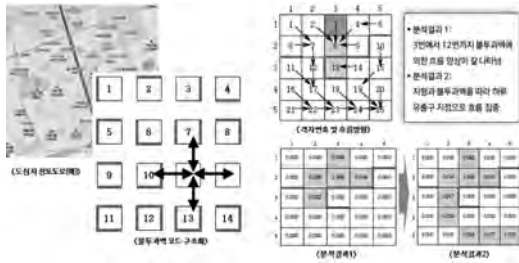
특히 UFAM은 지상 부분과 지하 부분에 있어서 많은 특징을 가지고 있으며, 지상부분에 상용모형에서 구현 가능한 각종 요소 이외에도 빗물받이 요소, 성토구조물 요소, 컬버트 요소, 가상수로 요소, 건물 요소 등을 구현할 수 있는 모듈이 개발되어 있고, 국내에서 사용되는 모든 상용모형에서는 구현 할 수 없는 지하공간 모듈이 개발되어 있다.



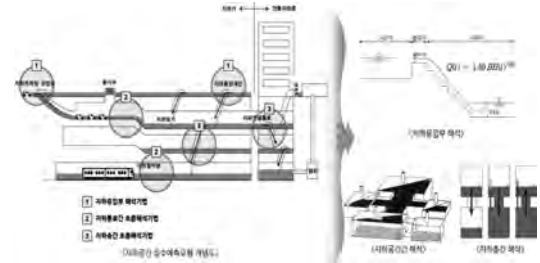
실제 및 가상 반사율이 개념



건물물 건폐율 흐름영향 요소



성토구조물 등 흐름방해요소



지하공간 침수해석 요소

도심지 유출요소	상용SWMM	FFC2Q	FFC3	FFC5	UFAM
강우	단일형	○	○	○	○
	실시간연계	X	X	X	X
	분포형	X	X	X	X
	지표흐름	○	X	○	○
지상	유역분할	○	○	○	○
	불투수/투수유출	○	○	○	○
	반사율	△	X	X	X
	건폐율영향	○	X	X	△
지하	성토구조물(가성벽)	X	X	X	X
	검버트	X	X	X	X
	가성수로	△	X	X	X
	지표유출유입	○	X	○	○
관망	홍수추적	○	○	○	○
	배수영향	○	○	○	○
	분기	○	○	○	○
지하	저류효과	○	○	○	○
	배수펌프	○	○	○	○
	지표유출유입	X	X	X	X
지하	지하공간 흐름	X	X	X	X
	지하철경도 흐름	X	X	X	X

**〈모형의 타별성〉**

**〈도시 우수유출 요소〉**

그림 7. 다양한 도시유출 영향 요소 반영

### 3.3 강우의 평면적 분포 입력을 고려

UFAM의 개발목적 중 가장 중요한 것은 실시간 도시홍수침수예경보를 위한 것이다. 즉, X band 레이다와 같은 기기에서 생성되는 예측강우를 활용하여 짧은 시간 내에 지상 및 지하공간 침수예측 모의를 수행한 후, 이를 활용하여 대피명령을 발령하기 위한 것이다.

특히 도시역은 건축물 등이 고도로 밀집된 관계로 강우의 공간적 변화가 매우 심하므로 강우의 평



면적인 분포 및 시간적 경과를 침수해석모형에 반드시 연계시킬 필요가 있다.

즉, 통상의 상용모형에서는 일정 지점에서의 강우 시간변화를 입력조건으로 모의하는 것이 보통이나, 도시역의 침수해석을 위해서는 해석대상 전역의 강우분포의 시간적 변화를 연계하는 것이 매우 중요하며, UFAM은 그러한 강우 평면분포를 입력할 수 있는 모듈이 구축되어 있다.

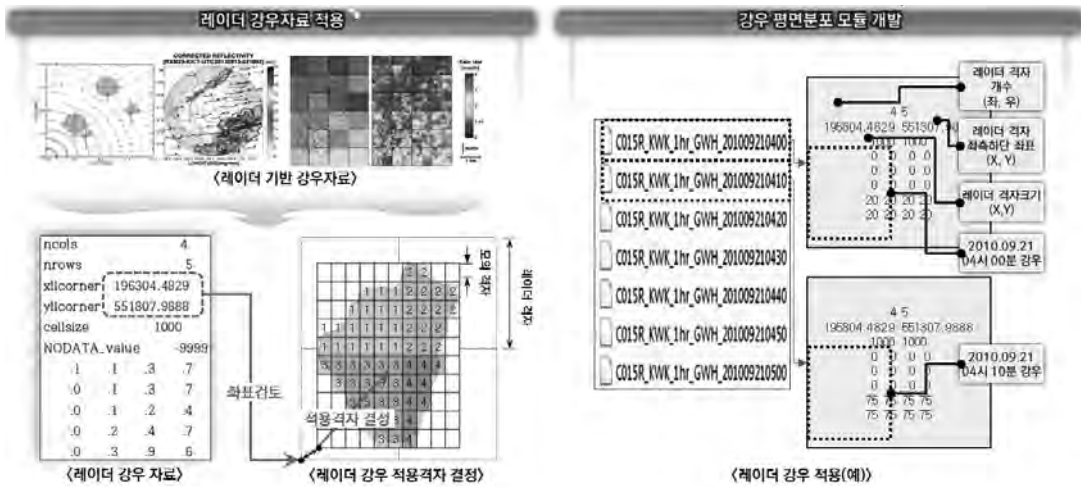


그림 8. 평면분포 레이더 강우 입력모듈의 개념

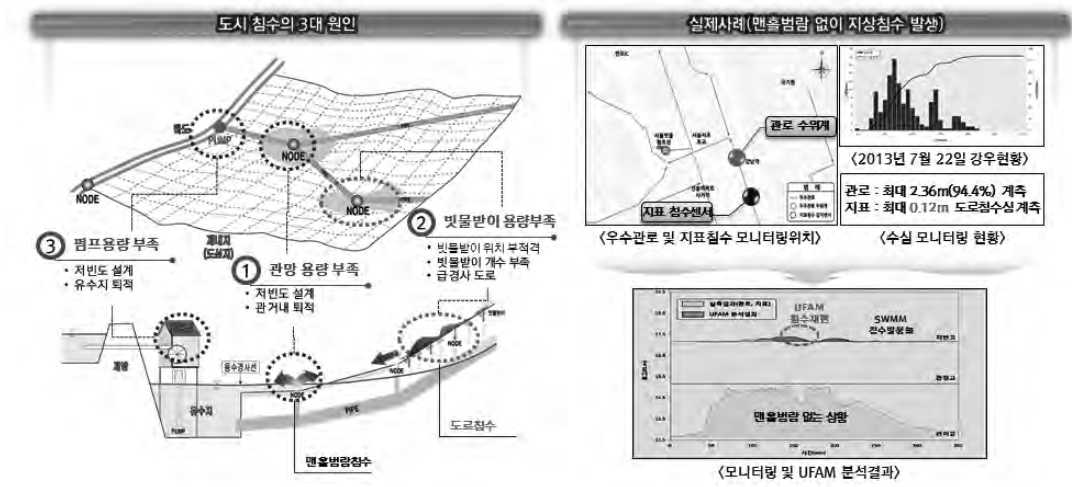


그림 9. 경사 도로 빗물받이 기능미비로 발행하는 침수원인

### 3.4 우리나라 도시 홍수침수특성 구현

도시에서 발생하는 침수는 크게 지상부에서의 원인과 관망부에서의 원인으로 구분할 수 있다. 관

망부에서의 원인은 관/배수펌프 용량 부족, 비정상적 연결 구조, 유지관리 미비, 우수의 동역학적 특성 미고려된 설계 등 매우 다양한 원인이 있으나 궁극적으로는 만관의 발생에 따른 급격한 동수경사의 상승 및 이에 따른 범람이 원인이라 할 수 있다.

지상부에서도 여러 가지 원인이 있을 수 있으나, 그 중에서 가장 주요한 원인은 지표에 흐르는 우수가 관망으로 흘러 들어가지 못하는 것이다. 즉 지표의 우수가 관망으로 유입되도록 설계된 빗물받이가 제 기능을 못하거나 잘못 설치되어 있거나 하는 것이다.

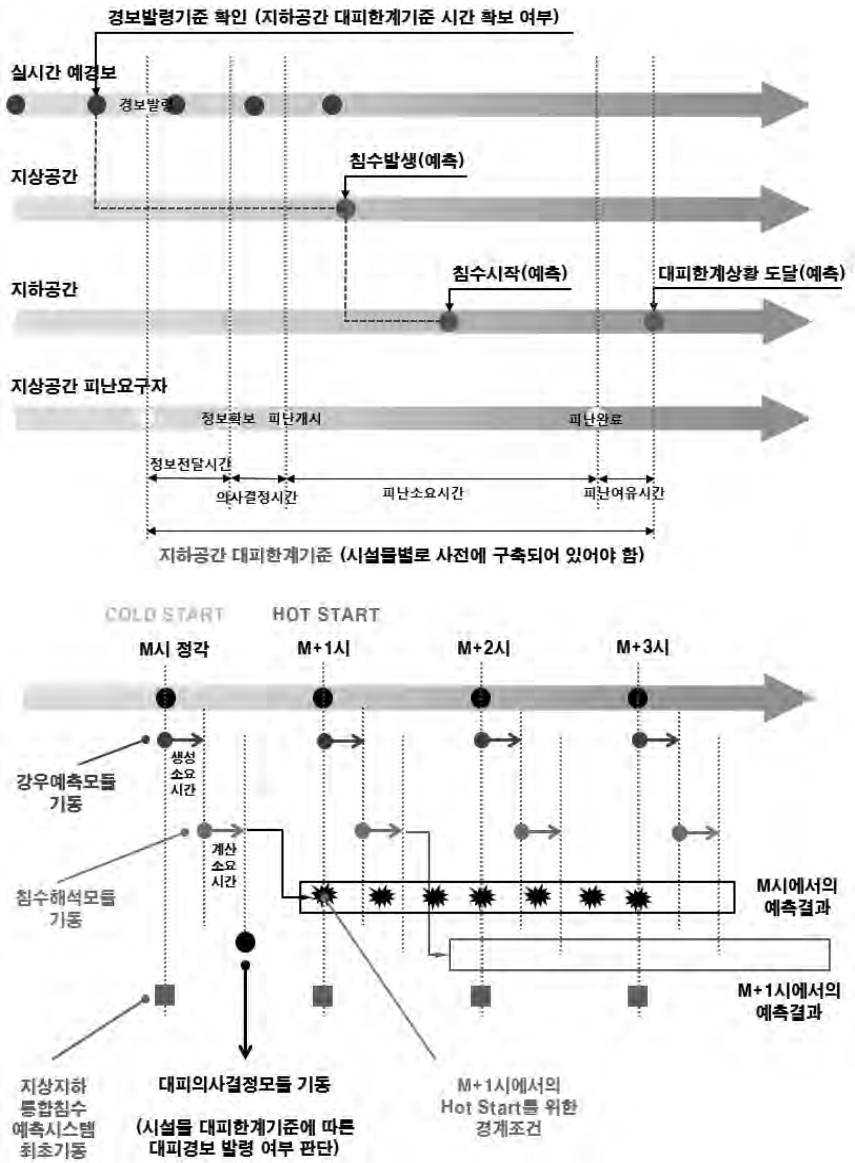


그림 10. 지하공간 대피한계기준(상) 및 실시간 예경보시스템의 흐름도(하)

특히 경사진 도로에 설치된 빗물받이는 우수의 차집 기능이 현저히 떨어지게 되며, 이러한 차집 되지 못한 우수가 도로를 연하여 유하하는 침수현상이 서울 강남역 사거리, 부산 국제시장 등에서 빈발하게 된다.

따라서 UFAM은 지표와 우수관망의 연계를 빗물받이 요소를 통해 구현함으로써 도로상에서 발생하는 국지적인 침수현상을 정확하게 모의 할 수 있는 특징이 있다.

### 3.5 실시간 예경보시스템의 실시간성이 고려된 모형

UFAM은 최종적으로 실시간 도시홍수침수예측을 통한 주민대피에 활용코자 개발되었다. 일정 시각에 홍수침수예측모형을 돌려 침수상황을 분석하고 유사시 대피경보를 현장에 전달하며, 대피지시를 받은 이용자가 대피에 걸리는 시간 그리고 피난여유시간 등을 종합적으로 고려해 보면, 도시역에서는 실시간 예보를 적어도 1시간 간격 이내로 실시해야 할 것이다. 이는 예측모의에 소요되는 시간은 매우 짧아야 하며, 길어도 10분 이내이어야 한다는 것을 의미하게 된다.

UFAM은 상술한 조건을 만족시키기 위해 지상부분의 범람수 거동모의를 2차원이 아닌 1차원적으로 접근하고 있으며, 이를 위해 계산격자 크기, 연산간격 등에 따른 총연산시간에 대한 분석을 통해, 실시간 예경보를 위한 격자기준 등을 제시하고 있다.

## 4. 결론

수년전 코엑스에서 개최되었던 국제생태수리학회에 어느 외국 학자가 참석하고서는 코엑스 지하가를 걸어 보고 하는 이야기가 “굉장히 넓고 다양하면서 멋진 곳”이라고 필자에게 이야기 하던 바로 그 때, 필자의 머릿속에서는 한강의 홍수영향으로 탄천 하구에서 범람이 발생하면 그 영향이 코엑스 지하공간까지 도달하는 데는 수분 체 안 걸리겠구나! 라는 생각이 머릿속을 스쳐 지나갔다.

하루 이용자만 수십만에서 백만을 넘나드는 다중이용 지하공간은 그 만큼 도시발전과 더불어 발전되어 왔으며, 앞으로도 이러한 경향은 증가할 것으로 판단된다. 이러한 시점에서 하천의 범람이든 내수의 범람이든 해수의 범람이든 일단 재난이 발생하면 외부상황을 잘 파악하기 힘들고 지상의 침수상황 보다 훨씬 심각한 침수상황이 벌어지는 지하공간의 특성상, 수많은 인명피해가 우려된다는 생각을 하는 것은 필자만의 생각은 아닐 것이다.

특히 설계빈도개념에 의한 시설물 설계는 해당 외력을 버틸 수 있는 시설을 구축하면 되는 일이나, 이와는 달리 인명피해 경감을 재난대책의 주요 목표로 하는 경우는 극한상황에 대한 고려가 반드시 있어야 할 것이다. 비가 관망의 설계빈도 보다 많이 내려서 지하공간이 침수되어 수많은 사람

이 목숨을 잃었다고 할 때, 설계빈도 보다 큰 비가 왔기 때문에 어쩔 수 없었던 일이라고 감히 누가 이야기 할 수 있겠는가??

UFAM 개발은 이러한 관점에서 어떻게 하면 하늘에서 내리는 강우에서부터 하천이나 바다로 흘러 들어가는 우수배제의 모든 과정을 통합적으로 모의 할 수 있으면서도 실시간 예경보를 위해 매우 빠르게 연산 할 수 있을 것인가 라는 전제 사항을 염두에 두고 개발되었다.

현재 UFAM 개발은 일단락 된 상황이고 앞으로는 실시간 예경보를 위한 시스템에의 이식이 남아 있는 상황이다.

UFAM은 국립재난안전연구원의 수년간에 걸친 장기 프로젝트로 개발될 수 있었으며, 몇 안되는 순수 국산기술로 개발된 프로그램이기도 하다. 이러한 프로그램이 생명력을 갖기 위해서는 자체 개발도 중요하지만 앞으로의 유지 관리를 위한 노력이 더욱 중요할 것으로 판단되며, 모처럼 국내 기술로 개발된 프로그램이 당초의 목적을 달성하고 국내 도시홍수침수예경보로의 역할을 충실히 수행 할 수 있는 제반여건이 성숙되기를 기대하는 바이다.

