

# 도시홍수재해 해석기술개발



윤 세 의 | 교수, 경기대학교 토목공학과/syyoon@kuic.kyonggi.ac.kr

## 1. 서론

도시홍수로부터 국민의 인명과 재산을 보호하기 위하여 건설교통부에서 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행하고 있는 건설핵심기술연구개발사업의 일환으로 「도시홍수재해관리기술연구사업단」이 구성되었고, 향후 5년간 도시홍수재해관리기술개발에 관하여 집중적인 연구를 수행하게 되었다.

제 1세부과제는 “도시홍수재해 해석기술 개발”로서 기존 도시홍수해석모형의 이론 및 국내 유역의 적용성을 분석하고, 대표유역의 관측 자료를 사용하여 국내 도시유역의 홍수 및 수질해석에 적합하고 실용적인 모형을 제시한다(제1세세부과제). 이들 기초로 하여 우수의 유도 및 차집을 위한 배수시스템 및 각종 배수시설의 설계기술 연구를 통하여 상습침수지역의 배수능력의 향상시키고(제2세세부과제), 도시홍수를 가증시키는 도시하천의 중형단 구조물의 수리영향을 분석하여 하도안정방안 및 대책기술을 개발한다(제3세세부과제). 수리모형 및 수치모의 실험을 실시하여 하천식생에 의한 홍수위 변동 예측기술을 개발하고, 유량변동에 따른 도시 하천생태영향평가 및 복원기술 제시한다(제4세세부과제). 또한 시험유역을 운영하여 수리, 수질 및 수문 자료를 수집, 분석 및 보급하여 도시홍수 예측, 경보 및 해석에 필요한 기

초 자료를 제공(제5세세부과제)하고자 한다. 이와 같이 제1세부과제에서는 5개 세세부과제로 나누어 단계별 연구계획을 수립하여 추진하고 있다. 세세부과제의 단계별 연구내용 및 1차년도 중간성과를 요약하면 다음과 같다.

## 2. 연구 내용

제 1 세부과제의 단계별 세세부과제의 내용은 표 1과 같다.

### 3. 1차년도 연구(총괄)성과 및 향후계획

#### 3.1 도시하천 유출, 수질 해석 모형 특성 연구

##### ■ 연구 성과

##### 1) 도시 유출해석모형 조사 및 분석

○ 도시 유출 모형(합리식, ILLUDAS, SWMM, STORM, MOUSE, MIKE-11, MIKE-SHE, IISDHM, IHDM, WEPM 등)의 기본이론, 매개변수, 적용성 분석

##### 2) 유출해석 모형의 특성 비교

도시유역에서 사용되고 있는 유출 모형의 특성을 표 2에 분석하였다.

표 1. 제 1 세부과제의 단계별 세세부과제의 연구 내용

세세부과제명	연차별 추진 내용				
	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
1-1 도시하천 유역의 수문,수리 및 수질해석 기술	도시하천 유출,수질 해석 모형 특성 연구	도시하천 유역의 유출, 수질 모형의 적용 및 응용기술 개발	유출, 수질모형의 적용성과 실용화	도시하천의 홍수 특성 연구	도시하천 유역의 홍수, 수질관리를 위한 설계요령 및 지침서개발
1-2 도시 배수계통 설계 기술	도시 배수구역의 유출해석 기술 개발	배수관로의 기초 수리실험 및 해석 기술	도시 배수관망의 수리설계기술 개발	도시 배수시스템 및 시설물 설계기술	도시 배수시스템 설계기술의 실용화
1-3 도시하천 중형단 및 복개구조물 등의 수리영향 분석기술	도시하천 중형단 구조물 현황 파악 및 수리특성 분석	연속 구조물의 수리 해석 기술	교량에 의한 세굴평가 기술 개발	교량세굴 방지공 설계기술	하천 중형단구조물 수리설계 기술 및 기준제시
1-4 도시 하천의 홍수시 생태수리 해석 기술	도시하천의 생태 및 수리특성 분석 기술	하도식생에 따른 홍수시 수위변화 예측 기술	하도 식생 및 하도설계	기술홍수시 도시하천 생태계 반응 평가기술	식생을 고려한 안정하도 설계 기술 및 지침서 개발
1-5 도시하천 시험유역의 운영과 실시간 계측기술	시험유역의 선정 및 계측, 운영 체계 구축	시험유역 운영 및 자료 분석	시험유역 운영 및 자료 분석	시험유역 운영 및 자료 분석	시험유역 운영 및 자료 분석 및 자료집 작성

표 2. 도시 유출모형의 특성 비교

구 분	합리식	RRL	ILLUDAS	SWMM	STORM	MOUSE
한계 호우사상의 선택	부 적 당	열 등 함	열 등 함	양 호	매우양호	양 호
도시지역의 예비해석	적 당 함	양 호	매우양호	양 호	양 호	양 호
도시지역의 세부해석	열 등 함	열 등 함	양 호	매우양호	적 당 함	매우양호
지체, 저류용량 해석	부 적 당	열 등 함	양 호	양 호	매우양호	양 호
지체, 저류용량 설계	부 적 당	열 등 함	양 호	매우양호	양 호	양 호
과부하 하수관 해석	부 적 당	부 적 당	부 적 당	양 호	부 적 당	양 호
소규모 계내에서의 침투유량예측	양 호	양 호	매우양호	양 호	열 등 함	양 호
하수관 설계(Open-pipe 흐름)	소 유 역 당	양 호	양 호	양 호	열 등 함	매우양호

3) 적용대상 유역

- 남가좌 배수구역
- Gray Haven 배수구역
- Kings Creek 배수구역

4) 민감도 분석 결과

- ILLUDAS 모형

- 강우규모가 작을수록 불투수면적비에 대해서 민감
- 강우규모가 클수록 관조도계수에 대해서 민감
- 강우지속시간이 짧을수록 불투수면적비에 대해서 민감
- 강우지속시간이 길수록 투수지역 지면경사에 대해서 민감

- Mononobe 강우분포형에서는 관 조도계수가 민감
- Yen-Chow 강우분포형에서는 불투수면적비가 민감
- 유역경사가 급할수록 투수유로길이, 투수경사에 대해 민감
- SWMM 모형
  - 강우규모가 클수록 관로에 관한 매개변수의 영향이 증가
  - 유역에 관한 매개변수의 경우 강우규모가 작을수록 민감
  - 강우지속시간이 길수록 불투수 면적비, 관로경사, 관로조도계수의 민감도가 현저하게 감소하는 경향이 있음
  - Mononobe 분포의 경우 관로경사가 타 분포형에 비하여 민감도가 큼
  - Yen-Chow 사다리꼴 분포의 경우 다른 분포형에 비하여 관로경사와 관로조도계수의 영향이 작음
  - 완경사 유역에서는 유역폭(유역길이)이 급경사 유역에서는 관로길이와 관로조도계수가 민감함
  - 경사 유역일수록 관로 매개변수에 대해 민감

5) 도시유출모형의 개발 구상

- 산지부에서의 유출량계산에는 Kinematic wave 이론 적용
- 하천망의 흐름은 1차원 부정류 가정으로 특성곡선법으로 해석
- 하수도망에서는 유하능력의 상한을 고려한 우수배수과정을 모형화하고, 펌프장 으로부터 하천망에 배수시킨 유량 계산을
- 제내지에서는 비구조격자 모형을 이용해 범람류의 평면2차원 해석

■ 향후 계획

- 유역의 매개변수 최적화

- 목적 함수, 유전자 알고리즘 등의 최적화 방안
- 실험유역을 통한 모형적용 비교(중랑천 실험유역 등)
- 도시유출 모형 개발
  - 하천망, 하수도망, 제내지에 대한 도시유출모형 개발

3.2 도시 배수구역의 유출해석 기술 개발

■ 연구 성과

- 1) 합리식의 문제점 및 개선 요소 도출
  - 홍수량 산정식 및 강우강도식의 개선
  - 기존 유출계수의 개선점 도출(강우강도, 재현기간별, 지표경사 등)
- 2) 도시유역의 배수안전도 예비 진단기법 연구
  - 도시배수계통의 구성요소 및 사고유형 분석
    - 과거 서울시 침수피해 원인 분석
  - 도시 내배수체계 문제점 및 개선방안
  - 도시유역의 배수안전도 진단을 위한 고려요소 및 점검방법
- 3) 불투수면적을 고려한 도시유역 CN 산정 연구 (서울시 사례를 중심으로)
  - 미계측 도시유역 CN 산정 방법 분석
  - 불투수율에 따른 CN 산정 및 분석
  - 도시화와 불투수율과의 관계 분석
- 4) 하수관의 부등류 마찰흐름 특성에 관한 연구
  - 하수관 출구 수심의 결정
  - 새로운 하수관 마찰계수 산정식 제시
  - 시계저울 유량계(CBDMeter)의 개발
    - 시계저울 유량계의 기본원리는 유입되는 물을 Load cell로 무게를 측정하여 물의 단위중량을 통해 부피로 환산, 직접적으로 실제유량을 (m<sup>3</sup>/s)을 측정
    - 출력결과는 사용자가 정하는 시간간격(sec)에

맞추어 연속적으로 유량을 측정, 그래프화 하여 장기간(day)의 유량 데이터 저장이 가능하며, 조정가능 최소시간간격은 1sec이고 측정 오차는 0.04%로써 매우 높은 정밀도를 유지

### ■ 향후 계획

- 도시구역의 배수시설물별 실태파악
- 배수시설물별 안전도 진단을 위한 판단기준 및 가중치 설정
- 배수안전도 예비진단을 위한 체크리스트 작성
- GIS 기법에 의한 침수범람도 Mapping과 배수계통, 배수시설물의 종류 및 위치 등과의 상관관계에 의한 배수안전도 진단기법 연구
- 도시구역의 배수안전도 예비진단 요령 및 절차 제시
- 도시구역의 배수안전도 예비진단기법 적용 예제

## 3.3 도시하천 중형단 구조물 현황 파악 및 수리 특성 분석

### ■ 연구 성과

#### 1) 국내외 설계기준 검토

- 국내외 설계기준
  - 하천 중형단 구조물의 국내 설계기준 미비 - 하천설계기준(수자원학회, 2000)
  - 도로교 설계기준(대한토목학회, 2003)은 하천설계기준을 참조
- 국외 설계기준 검토
  - 미국 : 미 연방도로국(FHWA, Federal Highway Administration) 및 각 주 교통국(DOT, Department of Transportation)에서 교량설계에 대한 기준 제시
  - 일본 : 건설성, 교량건설협회 및 도로공단에서 기준제시
- 국내외 설계기준 비교 검토
  - 교량설계를 위한 설계빈도의 결정

- 미국 : 평균 일일 교통량(ADT, Average Daily Traffic)을 기준으로 결정
- 영국 : 교량의 위치 및 중요도에 따라 설계 빈도 결정
- 한국, 일본 : 교량의 크기에 따라 결정
- 교각형태 및 배치 등에 대한 설계기준 여부
- 한국, 일본 : 계획 홍수량을 기준으로 여유고 및 경간장 기준 제시
- 미국 : 교량 및 교대의 형상 및 유송잡물의 영향을 고려하여 여유고 제시
- 구체적인 경간장 기준을 제시하지 않으나 세굴영향 및 여유고와 제방고 고려

#### ○ 국내 설계기준 문제점 파악

- 도시하천에 대한 수리적 특성 및 구조물의 특성 반영하지 못함
- 교각형태 및 배치에 따른 다양한 조건을 고려하지 못함
- 교량의 방재와 관련된 각종 특성인자들의 내용이 불분명
- 기존교량의 수리학적 안전성평가 방법 수립 필요
- 세굴깊이 산정을 위한 구체적인 단계별 절차 수립 필요
- 유송잡물 차단 시설 설치방안 필요
- 우리나라 실정에 맞는 도로 횡단 암거 설계 요령 개발 필요

#### 2) 세굴방지 대책

- 세굴 인자 분석
- 세굴 산정 공식 분석
- 세굴 방지 대책 조사 분석

#### 3) 교량구조물에 의한 홍수 피해 원인 조사

- 1990년 ~ 1995년 경기도내 홍수로 인한 피해 유형
  - 하상세굴 53%, 교량고 불충분 25%, 유송잡물

9%, 교량연장 부족 8%, 교도 보호공 부실 5%

4) 현장조사 내용 및 대상지역 선정

○ 현장조사 내용

- 교량구조물 및 종횡단 구조물 현황파악, 과거 홍수피해 원인 탐문조사
- 세굴보호공 적용사례 및 설치효과 검토

○ 도시 중소 하천 중 조사 목적에 적합한 대상지역 선정

- 안양천과 지류(학의천, 삼성천, 산본천)
- 굴포천과 지류(계산천, 청천천)
- 중랑천과 지류(석천, 방학천, 화계천, 우이천, 묵동천)
- 탄천과 지류(세곡천, 상적천, 여수천, 야탑천, 분당천)

○ 조사결과

- 교각에 의한 통수 단면 감소
- 병렬 교량으로 인한 통수 단면 감소
- 유사되적으로 인한 통수단면 감소
- 세굴 피해
- 보도교나 차량소통을 위한 소형교량에 의한 흐름장애
- 교량 공사나 및 하천 정비로 설치된 장애물에 의한 흐름장애
- 유송잡물에 의한 피해 : 위의 6가지 피해와 병행 되어 피해를 가중
- 기타 구조물(차집시설, 집수정 등)에 의한 통수단면 감소
- 홍수위보다 낮은 교량

■ 향후 계획

- 문헌 조사 : 가용 수치모형 조사
- 지속적인 현장조사 및 문제점 파악
  - 종횡단 구조물 제원조사
  - 홍수시 영향을 미칠 수 있는 주변 환경 조사
  - 홍수시 종횡단 구조물로 인한 세굴 피해 및 수위변화 관찰

○ 수치 및 수리실험계획 작성

- 실험목표, 대상구조물 및 실험 범위의 선정
- 주요 parameter 선정, 실험계획 및 세부 검토 항목 선정
- 적용 수치모형의 선정
- 실험결과의 활용 및 적용방안 검토

3.4 도시하천의 생태 및 수리특성 분석 기술

■ 연구 성과

1) 국내외 하도식재 기술분석

○ 하도식재 연구현황 및 수목분포 현황 조사

- 도시하천의 식생 현지조사 : 수원천, 중랑천 유역을 중심으로

○ 국내외 하도식재 가이드라인 분석

- 한국, 일본, 독일의 하도식재 가이드라인을 요약 분석

○ 국내외 수목을 고려한 수리해석 모형 조사

- 국내의 경우(하천구역내 나무심기 및 관리에 관한 기준)
  - 준2차원 모형으로 각 단면의 유속차에 의해 경계면에 생기는 저항을 구하고, 운동량 보존의 원리에 의해 수위의 종단변화를 계산
- 일본(리버프론트센터)

- 1차원 해석 : 1단면에 1개의 조도계수를 부여하는 방법으로, 일반적으로 매닝의 평균 유속공식에 의한 조도계수를 사용
- 준2차원 해석 : 횡단방향의 운동량수송에 의한 간섭효과를 나타내는 항을 운동식에 더해 수목군 경계나 저수로와 고수부 경계에서의 운동량손실을 합리적으로 고려
- 평면2차원해석 : 2차원 천수방정식을 기본으로 하고 투과계수와 수평와점성계수 고려하여 운동량방정식을 구성
- 3차원해석 : 비압축성유체에 관한 Navier-Stokes 방정식을 이용하고 투과계수와 수직 와점성계수 고려하여 운동량방정식 구성

- 독일(Pache) : 식생의 저항을 고려한 마찰계수를 운동량방정식에 적용하여 수위를 계산함
- 미국(Darby) : 하상재료와 식생특성별 마찰식과 Wark 등(1990)의 운동량방정식을 기초로 하여 수위 변화를 예측.

## 2) 하도식생에 의한 수리학적 변화 예측모형의 개발

### ○ 문헌조사

- 식생된 개수로의 흐름특성
- 식생된 개수로의 조도계수 산정
- 식생된 개수로의 와의 수직구조

### ○ 수치모형

- RSM 모형의 개요
  - 레이놀즈응력 모형(RSM: Reynolds Stress Model)은 난류점성 개념을 사용하지 않고 레이놀즈응력의 수송방정식을 직접 해석하는 방법으로 비등방성 난류흐름을 비교적 정확하게 예측할 수 있는 기법.
  - 레이놀즈응력의 수송방정식에 포함된 항 중에서 레이놀즈응력의 생성항을 제외한 레이놀즈응력의 소산률항, 난류확산항, 그리고 압력-변형률 상관항(pressure-strain correlation)의 모델링 필요.
  - 특히 압력-변형률 상관항은 난류운동에너지의 양을 일정하게 유지하면서 각각의 레이놀즈응력에 포함된 난류운동에너지를 재분배하며, 이에 대한 모형은 개수로 흐름에서 비등방성의 난류구조를 정확히 모의하는데 매우 중요.

## 3) 식생수리실험 계획

### ○ 국내외 식생수리실험 사례 조사

- 국외 사례 : Kouwen 등(1969), El-Hakim 등(1992), Tsujimoto 등(1992), Stephan 등(2002)
- 국내 사례 : 이삼희 등(1999), 권기원 등(2000), 여홍구 등(2003)

### ○ 수리실험에 사용된 식재 모형 종류 조사

### ○ 식생수리 실험 계획

- 식생수리실험에 관한 기존의 연구결과 정리
  - 조도 특성, 유속 분포, 마찰계수와 조도계수
- 식생수리실험 계획 수립
  - 식재 모형 재료 결정, 식재 모형(모의 식생)의 휨강성 측정
  - 선정된 모의식생에 대한 검증 실험
- 식생활착 하천의 홍수시 거동 양상 조사(성북천)
  - 조사결과 : 성북천 하상경사가 급한 관계로 홍수시 높은 유속과 소류력이 발생되어 일부 고수부지 구간에서 야자섬 유망, 식생, 사석 등이 유실

## ■ 향후 계획

- 도시하천의 식생현황의 현장 조사 - 수원천, 중랑천
- 식생에 따른 홍수위 영향 분석
- 수치모형의 개발
- 도시하천에 식생에 따른 영향분석을 위한 모니터링 대상하천의 선정

## 3.5 시험유역의 선정 및 계측 운영체계 구축

## ■ 연구 성과

### 1) 국내외 시험유역 운영사례 조사(그림 1, 2)

- 설마천 시험유역
- 국립산림과학원 시험유역
- 청계천, 안양천 모니터링시스템(프런티어 과제)
- 미국, 캐나다, 프랑스, 영국, 덴마크, 스웨덴, 스위스, 헝가리, 이탈리아, 유고슬라비아 노르웨이, 호주, 대만 등 총 34개 시험유역조사

### 2) 시험유역의 선정 및 조사

- 도시하천 시험유역
  - 대상하천 : 중랑천
  - 중랑천 유역개황 및 지형특성 조사

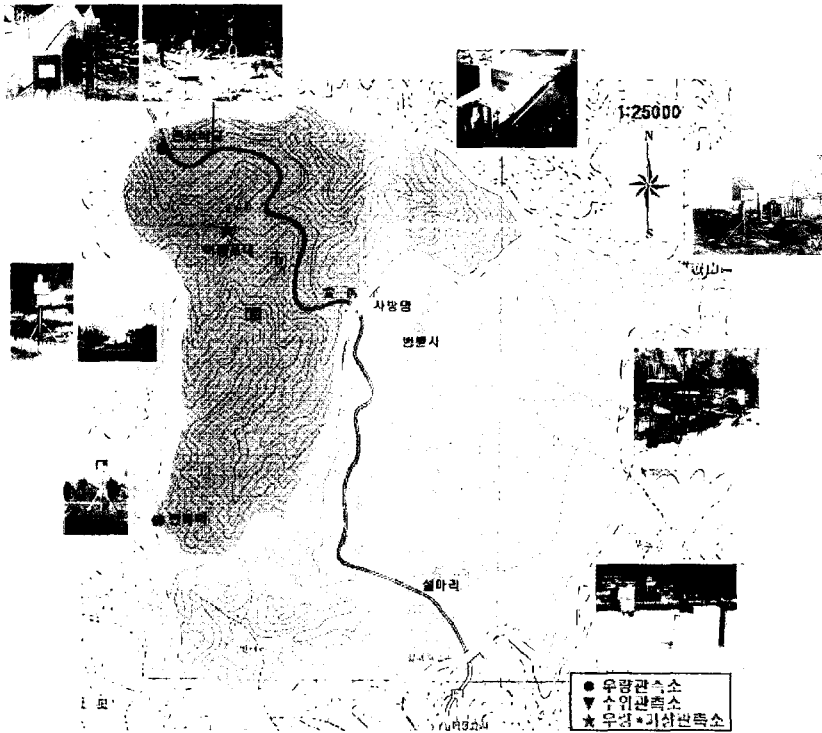


그림 1. 국내 설마천 시험유역

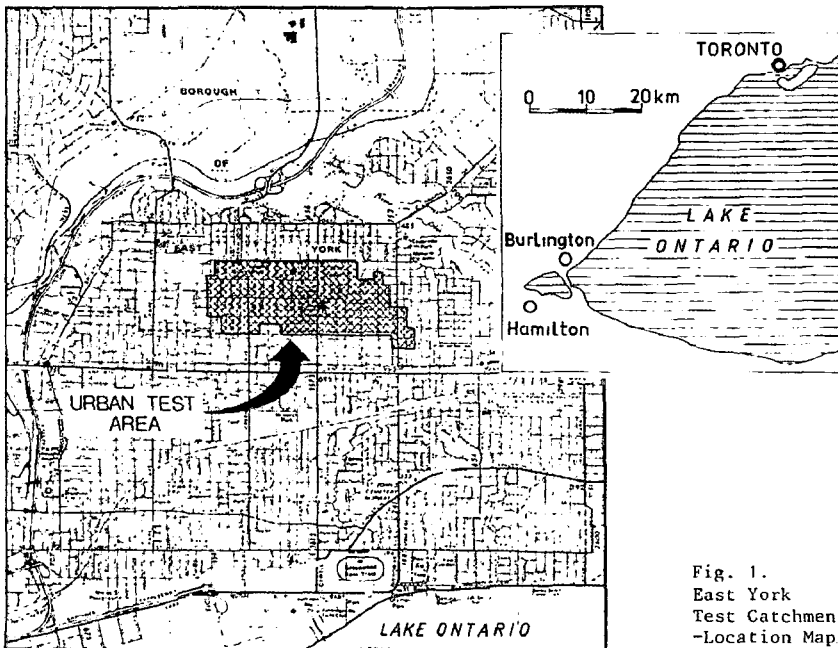


Fig. 1.  
East York  
Test Catchment  
-Location Map

그림 2. Toronto East York 시험유역

- 수계 및 인구 현황, 토지이용 및 토양도 현황, 배수계통 구성,
- 유역 및 하도유출 특성인자 조사
- 하천관리 현황 조사
  - 하천 및 하수도 시설물 조사
- 개발단지 시험유역
  - 유역선정 예정지 : 경기도 일산(한산천, 중산천, 소개천 중 1)
  - 일산지역의 기존 관측시설 및 자료 특성 조사
  - 대상유역의 배수체계 및 유역 특성 조사

### 3) 서울시 수문관측 및 D/B 시스템

- 개방구조형 시스템 구성으로 이기종간의 연계 가능
- Middleware을 이용한 즉각적인 자료수집의 안정성 확보
- 시스템의 원활한 유지, 보수, 관리가 가능
- 홍수정보 web 시스템
  - 서울시 방재상황에 영향을 미치는 정보를 시민들에게 공유
  - 인터넷을 통해 공유된 관측정보를 긴급 상황

- 발생 시 피해예방 및 신속한 의사결정 지원
- 구성자료 기능
  - 강우량 자료(현재 강우량, 누계우량), 하천 수위자료, 댐 정보
  - 재해대피관련 정보(태풍발생시 시민행동요령, 대피소의 위치 등)

### ■ 향후 계획

- 정밀한 현장 답사 및 조사를 통한 유역 선정 완료
- 유역 특성에 적절한 관측기기 선정
- 관측 기기 설치 및 시험 운영
- 지속적인 외국시험유역 사례 조사 및 특정지역의 현지조사
- 비시계열 및 시계열 자료의 지속적인 D/B 구축
- 기존 서울시 관측망의 활용성 평가를 위한 관측강우-수위자료 분석
- 실시간 강우-수위자료의 수신을 위한 서울시 방재센터 D/B 시스템과의 연계
- 적절한 중량천 시험유역의 관측망 설계와 운영 관리 지침 마련