

도시홍수관리기술의 연구개발방향



이 종 태 | 교수, 경기대학교 토목공학과/jtleee@kyonggi.ac.kr

1. 서론

우리나라는 1960년대 이후 급속한 산업화를 계기로 도시인구가 급증하고 시가지의 개발이 촉진되고, 도시 근교의 구릉이나 계곡이 절취되며, 전답이 매립되어 택지 또는 상공업 지역화하는 단지개발이 이루어지는 등 도시화 현상이 급진전되었다. 도시화가 이루어짐에 따라 토지의 투수성은 건물과 포장 등에 의하여 불투수성으로 변경되어 침투에 의한 손실은 감소하고 지표면 조도도 감소하므로 유출지점에서의 침투유량과 전제유량이 증가하는 현상이 발생하며 여러 수문학적 인자(투수유역 증대, 기온, 증발산량 등)들에 큰 영향을 미침으로써 도시홍수재해를 증대시키는 요인이 되기도 한다.

도시지역 호우피해의 일차적인 원인은 유역의 도시화와 수문기상 현상의 변화에 기인하며 이러한 변화에 슬기롭게 대응하는 정책과 기술을 연구개발해 나가는 것은 홍수재해로 인한 인명 및 재산손실의 피해와 침수로 인한 각종 도시기능의 장애를 저감시키기 위한 필수 요건이다.

통상 도시 홍수피해는 도시배수 계통의 용량초과, 집수시설의 미비, 교량 등의 하천시설물에 의한 장애, 자연유하 불량, 하천 및 유수지의 수위상승 등 그 원인이 매우 다양하며 서로 연관되어 발생하는 경우가 많다. 특히 하천 제방 범람에 의한 외수 피해

와 집중호우에 의해 도로 노면수의 배수불량으로 내수 피해가 겹치는 경우 그 피해는 막심하며 이에 대한 효율적인 각종 대응책을 미리 강구하는 것이 중요하다. 즉, 도시 수문기상 현상과 유출 특성을 파악하고 홍수로 인한 인명 및 재산피해를 최소화할 수 있는 적절한 내배수체계 개선과 예경보 시스템의 확립, 토지이용과 개발에 따른 유출량 증가해소를 위한 저류·지체시설 도입 등의 적절한 대책을 강구해야 하며 이를 위한 기술개발이 뒷받침되어야 할 것인바 이 글에서는 그 주요 과제 및 연구방향을 살펴보고자 한다.

2. 도시홍수 관리기술의 현재상태 및 연구방향

도시홍수관리를 위한 계획 및 설계에 있어서 자주 겪게 되는 기술적 어려움들을 주로 도시 수문·수리학 측면에서 다음의 11개항으로 도출하여 정리하여 보았다.

2.1 도시 배수구역의 목표 치수안전도

도시지역의 우수배제시설계획에서 목표로 하는 치수안전도는 방재적인 측면과 경제적인 측면에서 중요한 요소이나 이들은 서로 상반되는 관계에 있다. 그러므로 적정 설계빈도는 지역의 중요도, 경제성과 함

표 1. 국내외 우수배제시설 설계빈도

국명	구분	설계빈도
한국	서울시 하수관거	간선 10년/지선 5년
	동경	75mm/hr
일본	오오사카	60mm/hr
	요코하마	60mm/hr
미국	주거지역	5년
	상업지역과 고도의 개발지역	10~50년
	홍수보호시설지역	50년이상
	소도시 우수배수관거	2~25년
영국	대도시 우수배수관거	25~50년
	도시중심지역	2~25년
	큰 피해예상지역	25~50년
호주	고도의 상·공업지역	25~100년
	큰 재산피해예상지역	25~100년
	상·공업지역, 고도의 주거지역	10~25년
	산재한 주거지역, 공원	1~10년

자료 : '이수해백서, 서울특별시

계 배수구역의 강우, 유출특성 및 토지이용 등의 여건을 고려한다.

이미 우리는 서울을 비롯한 많은 도시지역에서 국지성 집중호우 및 태풍에 의하여 하천연안이나 저지대를 중심으로 반복적인 침수피해가 발생한 바 있어 침수지역을 대상으로 각종 우수배제시설을 강화시켜 나가고 있으나, 그에 따른 시설투자규모를 결정하는 목표 치수안전도의 결정에 어려움을 겪고 있다.

설계빈도는 국가와 도시지역별로 그 강우양상과 유출특성 및 인구, 토지이용상황이 각기 다르므로 외국의 기준을 우리나라에 직접 적용하기에도 어려움이 있다. 또한, 이미 개발된 도시에서 설계빈도를 추가로 높인다는 것은 막대한 자원과 시간이 요구되는 것이므로 현실적으로 어려운 지역도 많다. 따라서 현시점에서는 과거의 강우양상, 지역특성 및 지역경제 등을 고려하여 기존의 설계빈도에 따라 내배수계통을 관리하면서 지형적으로 취약한 지역과 새로 개발 및 재개발되는 지역과 시설물에 대해서는 치수안전도를 증대시키는 각종 방안을 도입토록 계획, 관리하는 것이 바람직한 것으로 판단되며, 이를 구체적으로 뒷받침하는 다양한 연구가 필요하다.

2.2 홍수량 산정기술

도시지역은 자연·농촌지역과는 달리 산지·녹지·주거지·도로 등으로 토지이용상태가 다양하고 노면유출, 하수도 등의 유출경로를 거치게 되므로 이를 적정하게 고려하는 유출해석 모형의 선택과 적용이 중요하다. 그러나 현재 우리나라에서 도시지역에 많이 사용되는 합리식, RRL, ILLUDAS, SWMM 등의 모형을 사용함에 있어서 검토대상 유역에 따라 모형을 선택하는 근거가 충분하지 못하며, 사용되는 유출계수 등의 주요 매개변수들은 계산 결과에 직접적인 영향을 줌에도 불구하고 충분한 관측자료에 근거하여 제시되는 선택기준이 결여되어 있는 실정이다. 따라서 우리나라 도시유역에 대한 관측과 검증절차가 지속적으로 이루어지고 검토되어야 할 것이며 설계강우의 규모, 지속시간과 강우 분포형에 대한 연구와 더불어, 우리나라에 적합한 도시유출 모형의 개발이 요망된다.

2.3 하천시설물 안전도 평가기법

최근 들어 지구온난화에 따른 이상기후 및 집중호

우의 발생, 급격한 도시화 및 산업화에 따른 유출양상의 변화, 인명·재산 등의 홍수피해규모의 증대에 대응하기 위해서는 설계빈도의 상향조정 등 확정론적인 방법에만 의존하기보다는 추계학적 방법에 의한 수문량 평가와 매개변수의 변동성을 고려한 불확실성 해석 등의 방법에 의한 보완이 필요하다.

현재로서는 하천제방고 등 하천시설물 규모 결정에서 예상되는 수문·수리학적인 불확실성을 극복하기 위하여 가장 적절한 설계홍수량을 산정하고 여유고의 개념을 도입하여 설계상 안전치를 갖도록 설계하고 있으나, 1990년대 초 미국의 육군 공병단에서는 이러한 설계빈도에 따라 일률적으로 고정되어 있는 여유고를 제내지에서의 피해 가능정도에 따라 상이하게 설정되어야 함을 제시한 바 있다.

홍수 방어 구조물의 신뢰도를 향상시키기 위하여서는 수문설계시 불확실성을 고려하여 신뢰도 분석을 실시하여야 할 것으로 판단되며, 이를 실용적으로 적용하는 연구가 요망된다.

2.4 하수도의 통수능 평가와 유지관리기술

과거의 침수피해의 대부분은 소하천 및 지천들의 범람, 제방의 붕괴, 역류 등으로 인한 외수피해와 배수로, 하수도 및 펌프장의 내수배제능력 부족이 주원

인인 내수피해가 동시에 발생하였으나, 최근 침수 피해는 주로 내수에 의한 것이 특징으로 나타나고 있다.

실제로 도시지역에서 빈발하는 국지적인 침수피해의 원인은 근본적으로는 설계규모를 초과하는 강우에 의한 결과이었으나 내수배제시설의 불량도 주된 원인의 하나가 되고 있다(그림 1).

하수관거는 도시의 우수와 오수를 배제 처리하는 시설로서 재해와 환경을 동시에 담보하는 시설로서 설계-시공-유지관리-정비 및 갱신의 각 단계에서 합리적이고 도시의 발전과 강우패턴에 부합하는 각종 기준과 기술의 지속적인 개발이 필요하다.

2.5 우수지 및 빗물펌프장의 적정설계와 운영기술

내수배제불량으로 인한 침수피해에 대처하기 위하여 도시지역의 하류부 저지대에서는 홍수시 자연방류가 불가능한 경우에 대비하여 강제배수를 위한 우수지 및 빗물펌프장을 설치, 운영하고 있다.

그러나, 시설치 운영되고 있는 펌프장에서 겪는 어려움 중에서는 일부 관리인력의 전문성 부족과 일부 펌프장에서는 가동 기준의 적정성 등이 문제가 되고 있다. 펌프장의 펌프가동대수는 우수지 수위에 따라 결정되고 있으나 최근에 해마다 빈발하고 있는 국지성 집중호우에 대한 사전 대응에 어려움이 있으며,

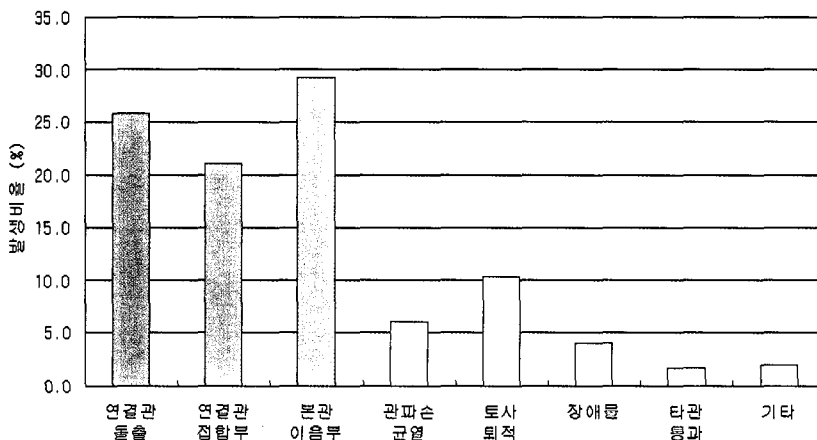


그림 1. 서울시 하수관거 불량원인 비율(2001)

지역 주민의 불신과 과잉요구 등에 의한 마찰 등 다양한 문제를 야기 시키고 있는 실정이다.

또한, 수해지역의 주민과의 갈등을 해소하기 위한 명목으로 빗물펌프장이 과다하게 신설되거나 증축되는 경향이 많아 투자 및 유지관리면에서 그 효율성이 문제가 되고 있다. 따라서 현재 우리나라에서 설치, 운영되고 있는 빗물펌프장의 설계 및 유지관리상의 문제를 파악하고, 관련시설기준의 적정성 및 유지, 운영에 관한 기술향상이 필요하다.

2.6 하천장애물 문제와 하천복원

홍수시 하천 중·횡단구조물로 인한 수위상승은 홍수피해를 가중시키며, 특히 교량의 파괴, 유실은 주위 제방이나 호안에도 영향을 주어 제방 붕괴요인이 되는 사례가 빈번하다.

한편, 최근까지 도시하천의 복개는 주로 대도시나 중, 소도시의 도심지역을 중심으로, 도로 및 주차 공간 확보의 명목으로 하천복개가 보편화됨으로써 하천 관리의 큰 문제점이 되고 있다. 실제로 서울시의 경우를 보면, 한강 42km 구간을 제외한 총연장 196km의 시내하천의 32.3%인 63.3km를 복개하여 하천이 아닌 타 용도로 사용하고 있다.

이와 같은 하천 복개 또는 부분 복개와 도로확장 등의 명목으로 이루어지고 있는 하천부지 잠식은 하천의 통수단면적의 감소와 교각장애 등으로 인하여 상류방향으로 배수 영향을 미치게 되어 대규모 하천 범람, 역류 등의 원인이 될 수 있다.

그럼에도 불구하고 교통난 해소 및 경제성 등을 빌미로 이루어지는 하천중단교량 등의 신규시설물에 의한 하천공간 잠식은 아직도 진행되고 있는 실정으로써 이는 적극적으로 억제해야 할 것이며, 기존 교량, 중·횡단구조물의 개량 및 복개구조물의 철거와 하천 복원 노력도 지속적으로 이행되어야 할 것인바, 이를 위한 구조물 구간의 수리해석, 호안, 하천복원기술 등의 개발이 필요하다.

2.7 도시소하천의 설계와 관리

소하천정비사업은 소하천의 치수적인 측면, 이수측면, 환경측면 그리고 하천유지관리측면에서의 기능과 역할을 다할 수 있도록 하는데 목적이 있으며, 이를 위해서는 수계를 일관하는 국가·지방하천계획과 지역토지이용계획 등과 유기적인 조화가 전제되어야 한다.

전국적으로 광범위하게 추진되는 소하천의 정비사업에서는 소하천 연변의 홍수피해를 줄이기 위한 방편으로서 과대한 하천폭의 확장이나 직강화 등이 행해져 왔으나 이는 오히려 인구와 산업시설이 상대적으로 많이 밀집되어 있는 지역을 관류하는 중·대하천의 침투홍수량 증대와 도달시간 단축 등을 초래함으로써 홍수재해위험성을 오히려 가중시키 결과를 초래할 수 있음을 간과해서는 안 될 것이다.

또한, 하천의 복개, 하천부지상의 도로, 교량 등과 같은 중·횡단구조물의 설치 등 하천내 타 시설물의 과다점용에 따른 통수단면 부족 및 배수영향, 하천연변의 토지이용의 증대에 따른 유출량의 증대 등과 같은 인위적인 요인도 소하천 홍수피해를 가중하는 원인이 될 수 있음에도 불구하고 대부분의 도시 소하천은 복개되거나 하수도화 되어 있는 실정이다.

따라서 소하천정비계획에서도 지방하천에서와 마찬가지로 치수측면에서 홍수소통을 위한 충분한 통수단면 확보계획, 평형상상 유지계획, 유지관리 및 수방활동을 고려한 제방계획, 원활한 내수배제 계획, 제방과 토사 유실방지 및 자연환경 호안계획, 이수·환경기능과의 연계 및 복원 계획이 포함되어야 하며 이를 뒷받침해 주기 위한 소하천의 특성을 고려하는 세부설계기술의 개발이 필요하다.

2.8 수문관측과 홍수예보 및 하천관리시스템

비구조적 홍수방재 대책을 대표하는 홍수예경보 시스템은 통상 관측시스템과 예측 모형 시스템으로 구성되어 있다. 관측 시스템은 강우 및 하천수위 등을 실시간으로 관측하여 자료를 수집하는 시스템이

며, 모형 시스템은 이들 관측자료를 이용하여 현재의 수문 및 기상상태에서 향후 특정시간의 강수량 및 하천유량의 변화량을 사전에 예측하는 시스템을 말한다. 모형 시스템에서는 통상 강우, 증발산, 침투, 지표유출, 하도 홍수추적 등 수문학의 전 과정을 모형화하며, 특히 도시지역의 경우 이와 같은 홍수유출을 유발하는 제반 요소 이외에도 도시수문학이 갖는 특성이 고려된다.

실용성 있는 도시홍수 예·경보를 위한 예비시간을 확보하기 위하여서는 단순히 강우나 수위의 실시간 관측만으로는 부족한 면이 많다. 그 이유는 도시홍수의 특성에서 비롯되는 것으로서 홍수의 지체시간(lag time)이 비도시 지역보다 훨씬 짧고 강우의 형태도 집중호우의 성격을 갖기 때문이다. 이러한 조건 하에서 수방대비를 위한 선행시간(lead time)을 확보하는 노력은 모형시스템에서 가장 핵심적인 주제이며, 선행시간의 확보여부는 수해로 인한 인명 및 재산의 피해경감에 효과적으로 기여할 수 있는지의 여부에 직접적으로 관련된다. 이를 위해서는 기상레이더 및 강우예측기술을 도입한 실시간 강우 및 홍수 예·경보연계 시스템 구축이 필요하며, 관련 분야의 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

2.9 침수위험지도 작성

홍수예방을 위한 구조물적 치수대책은 많은 예산과 시간을 필요로 하여 적용에 한계가 있기 때문에, 구조물적 치수대책과 더불어 주민의 방재의식 고취를 통한 시민방재 활동참여의 활성화 등과 같은 비구조물적 대책의 중요성이 새롭게 부각되고 있으며 이를 통하여 실제로 인명피해를 효과적으로 줄일 수 있다는 것은 선진국의 사례를 교훈으로 삼아야 할 것이다.

따라서 지역주민의 홍수위험성 인지를 통한 피해최소화, 지방자치단체의 수방 및 지역방재계획 수립 등의 효율적인 대책을 마련하기 위하여서는 홍수시 피난경로, 피난장소 등의 기본자료로 활용할 각종 시나리오에 근거한 범람특성분석, 실용적 홍수재해지도

의 작성, 침수예상지역 및 침수시간 추정방법 등에 대한 연구가 필요하다.

2.10 우기시 하천수질 관리

합류식 하수관거 시스템에서는 하수처리장으로 차집되는 우수 유입량을 적절하게 조절하여 자연에 미치는 오염부하량을 최대한 줄임과 동시에 하수처리장 운전 효율적으로 유지토록 한다. 그러나 합류식 하수관거의 하류의 간선 또는 주간선 하수관거에 우수 토실을 설치하여 일정량(보통 건기 유량의 3배) 이상의 하수는 차집관거로 유입하지 못하도록 조절하고 있어 차집되지 못한 오수는 초기 우수와 함께 직접 하천으로 유출하게 된다. 이 때 하수의 농도는 토지 이용 양상, 시가지 청결정도, 강우강도 및 강우지속 시간 등에 따라 크게 차이가 있으나 강우시작과 함께 유출되는 초기 유출수에는 건기하수에 비해 많게는 10배가 넘는 높은 오염물질이 포함됨으로써 이로 인하여 하천 생태, 환경에 미치는 영향은 지대하다.

따라서, 합류식 하수관거 월류수(CSOs)로 인한 하천수질 영향을 합리적으로 관리하지 않는 한 공공수역의 수질을 보호, 보전함에는 한계가 있으므로 CSOs 및 초기강우에 대한 관리계획을 수립하여 강력히 추진하여야 할 필요가 있으며 우리나라의 실정에 맞는 실용적 연구가 요망된다.

2.11 우수유출 저감시설의 설계

우수유출 저감시설은 치수종합대책에 있어서, 과거 유역이 가지고 있던 보수 및 우수 기능을 보전하고, 택지개발에 따라 증가하는 유출량을 억제하고, 중·하류 지역에 대한 홍수 부담의 경감에 효과적으로 기여할 수 있는 시설로서 특히 홍수처리능력이 한계에 이른 도시지역에서는 이에 대한 관심과 적극적인 노력이 필요하다.

도시개발 및 택지개발과 같은 인위적인 개발사업으로 인해 증가하는 유출량을 저감시킬 수 있는 침투

표 3. 도시하수와 비점오염원의 농도비교

오염원 하수형태	SS (mg/l)	BOD (mg/l)	T-P (mg/l)	T-N (mg/l)	Lead (mg/l)	Total Coliforms (MPN/100ml)
도시우수 유출수	3~11,000	10~250	0.2~1.7	3~10	0.03~3.1	103~108
합류식관거 월류수	100~1,100	60~200	1~11	3~24	0.4	105~107
경공업지역 유출수	45~375	8~12	-	0.2~1.1	0.02~1.1	10
도시 미처리하수	235	160	10	35	-	107~109
도시 하수처리수	20	20	10	30	-	104~106

자료 : Ellis, J.B.(1986)

및 저류시설 등의 유출저감시설은 종래 배수위주의 도로, 조경위주의 공원, 운동공간제공을 위한 운동장 등과 같이 일차적인 목표만을 달성하기 위한 시설이 아닌 우수의 저류·지체 기능도 제공할 수 있도록 설계되어야 하며, 이에 따른 구체적인 시설 설치기준과 시방서가 마련되어야 한다.

또한, 현재 대규모 개발사업에 대해 적용하고 있는 재해영향평가에서 제외되고 있는 소규모 도시지역 개발사업에서도 유출량 저감, 빗물이용, 수질개선 등을 복합적으로 고려한 유출저감시설의 설치를 보편화해 나가는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 법적 근거와 시설기준을 마련하고, 이를 확산시킬 수 있는 여건을 조성하여야 하며, 우수유출 저감시설의 설계, 시공 및 유지관리 방안 등에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

3. 맺음말

이 글에서는 최근의 집중호우 빈발과 더불어 도시 지역의 급속한 팽창에 따른 도시하천 및 내배수시스템 설계 및 관리에서의 주요 기술적 문제점들을 제시하고 단계적으로 접근 가능한 홍수재해관리를 위한 기술개발의 연구방향을 제시하였다. 실제로 도시홍수와 관련된 문제는 단순히 수문·수리학적인 해법만으로 달성되는 것은 아니나 복합적인 문제일수록 기본적인 단위 기초연구가 우선되어야 하는 면이 더욱 강조될 수 있다.

따라서 그 동안 우리가 체험하고 연구한 성과를 바탕으로 우리 실정에 맞는 도시홍수 관리를 위한 실용적 기술을 창출해 나가는 일의 막중함을 학회의 일원으로서 절감한다.