

## 도시홍수 피해 저감을 위한 불투수면 규제 효과 분석\*

박창열\*\* · 신상영\*\*\*

### Analyzing the Flood Reduction Effects of Urban Impervious Surfaces Control\*

Changyeol Park\*\* · Sang Young Shin\*\*\*

**요약** : 최근 강우와 토지이용 변화로 인해 도시지역의 재해위험은 크게 증가되고 있다. 이에 본 연구에서는 불투수면 규제에 의한 유출 및 침수피해 저감효과를 살펴보고, 이를 근거로 불투수면 관리방향을 제시하였다. 이를 위해 3가지 불투수면 규제 시나리오를 작성하였으며, 각 시나리오에 대한 유출모의 결과를 비교하여 그 특성을 살펴보았다. 그 결과, 불투수면은 유출 및 침수피해 저감을 위한 관리대상 인자임을 확인하였다. 또한 내수침수 피해 저감과 물순환 체계 회복의 효과는 적용지역의 위치와 크기에 따라 달라질 수 있으므로, 가용 면적을 최대한 확보하는 것이 중요함을 알 수 있었다. 따라서 시가화율이 높은 도시 지역에서 불투수면 규제방안 수립시에는 전략적인 입지선정이 무엇보다 중요하며, 토지이용의 공간적 배치 현황과 재해취약지역에 대한 홍수 도달시간 등이 적절히 고려되어야 할 것이다. 본 연구의 성과로 전통적 수방시설 중심의 구조물 대책에 더하여 불투수율을 관리함으로써 침수재해에 보다 탄력적으로 대응할 수 있을 것으로 기대된다.

**주제어** : 불투수면, 토지이용, 침수피해, 유출저감

**ABSTRACT** : The changes of rainfall pattern and land use have increased disaster risks in urban areas. The purpose of this study is to evaluate urban flood reduction effects by the impervious surfaces control and to draw the management policy implications. Three scenarios for impervious surfaces control were considered. The characteristics of flood damage for the scenarios were compared against each other. From the results, it was found that impervious surfaces could be a significant factor for reduction of urban flood damage. There were differences in flood reduction effects with respect to the size and location of the areas surface control was applied. Thus, it is important to set strategies considering the spatial arrangement of land use and the time of concentration to disaster vulnerable areas when making a management plan of impervious surfaces. This study suggests that impervious surfaces control additional to structural flood mitigation measures would be helpful to reduce urban flood risk more fundamentally.

**Key Words** : impervious surfaces, land use, flood damage, runoff reduction

\* 본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(11첨단도시G09)에 의해 수행되었습니다.

\*\* 서울연구원 안전환경연구실 초빙부연구위원(Associate Research Fellow, Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute), 교신저자(E-mail: changyeol@si.re.kr, Tel: 02-2149-1218)

\*\*\* 서울연구원 안전환경연구실 연구위원(Research Fellow, Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute)

## I. 서론

인간사회의 발전은 자연 물순환(water cycle) 체계의 변화를 통해 실현되어 왔다. 이는 기본적으로 하천 연변으로 인구가 집중되어 왔기 때문인데, 이와 같은 인간활동은 불가피하게 우수의 흐름을 방해하게 된다. 단적인 예로 하천부지와 유수지 면적의 축소, 급속한 도시화로 인한 불투수 지역의 확대, 산림 및 녹지 공간의 축소 등을 들 수 있다. 더욱 심각한 문제는 지하수위 저하로 인한 도시하천의 건천화 문제와 더불어 수질오염 및 생태계 변화 등의 2차적인 환경문제로도 이어지고 있다는 점이다. 이와 같은 도시유역의 물순환 체계를 회복하고자 하는 노력은 국내외에서 쉽게 찾아볼 수 있다(환경부, 2006; 한강수계관리위원회, 2007; 최지용·고은주, 2008; 소방방재청, 2009, 서울특별시, 2011a).

도시유역 수문순환(hydrological cycle)의 대표적인 특성은 불투수면(impervious surfaces)이라 할 수 있다. 이미 잘 알려진 바와 같이, 불투수면의 규모와 하천수질 및 생태계, 유출 규모, 자연재해 피해액 등과의 상관성은 매우 높은 편이다(CWP, 2003; 한강수계관리위원회, 2006; 오동근 외, 2010; 한국환경정책·평가연구원, 2011; 심재현·김자은, 2012). 이러한 사실은 도시유역의 물순환 체계의 유지를 위해 유역 내의 불투수면 관리가 매우 중요함을 의미한다. 국내외에서도 유역의 물환경 관리지표로써 불투수면을 활용하고자 하는 시도를 찾아볼 수 있다(Brabec et al., 2002; Pappas et al., 2007; Hasse and Dornisch, 2009; Washburn et al., 2010; 엄정섭, 2004; 최지용 외, 2008). 또한 도시화에 의한 불투수면 증가는 지표면 유출을 증가시키고, 배수시설에 부담을 가중시킴으로써 내수침수 피해 위험을 증가시킨다(신상

영 외, 2011). 더욱 주목해야할 부분은 도시화에 따른 토지자원의 희소화와 가용지 부족으로 인해 재해에 취약한 저지대, 지하공간, 구릉지 등의 개발이 앞으로도 불가피하다는 점이다. 이로 인한 내수침수, 사면재해 등의 위험성은 더욱 높아질 수밖에 없다. 이에 본 연구에서는 기상이변, 토지이용 변화 등으로 더욱 악화되고 있는 도시지역의 재해위험을 해소하기 위해 불투수면 지표의 이용 가능성에 초점을 두고자 한다.

국내외 관련 연구들은 주로 도시화로 인한 불투수면의 증가가 유역의 수문학적 특성 변화에 어떠한 영향을 미치는지 파악해본 경우가 대부분이다(Wang et al., 2001; Miltner et al., 2004). 이들 연구는 불투수면이 강우-유출 과정에서 강우손실량(증발산량, 침투량 등)을 축소시킨다는 점에 근거한 것으로, 유역 유출응답의 특성이 극단적인 형태로 변화한다는 결론을 내고 있다. 대표적인 사례를 보면, Schueler(1987)는 불투수면적비와 유출물의 상관관계를 분석하였으며, 불투수면적이 증가할수록 유출물은 선형적으로 증가함을 확인한 바 있다. Neller(1988)는 도시유역의 유출 규모가 비도시유역에 비해 7배 이상으로 나타나며, 침투유량의 경우 3.5배 이상 증가함을 보인 바 있다. Schueler(1994)는 불투수면 증가로 인한 유출률 변화를 파악하였으며, 초지에서의 유출률은 6%에 불과하지만, 주차장의 경우는 95%임을 확인한 바 있다. Leopold(1994)는 20여 년의 개발로 인해 동일한 강우조건에 의한 침투유량이 2배 이상 증가하였음을 보인 바 있다. Doll et al.(2000)은 도시유역과 산림유역의 유출특성을 비교하였으며, 도시유역에서 침투유량의 증가가 매우 뚜렷하게 나타남을 확인하였으며, Konrad and Booth(2002)는 도로의 밀도가 증가할수록 연평균 유량을 초과하는 유량비율과 침투유량이 증가함을 밝

힌 바 있다. Sheng and Wilson(2009)은 LA 지역에 위치한 20개 소유역의 영향인자(수위자료, 강우의 공간분포, 토지이용/피복 특성, 인구밀도 등)를 이용하여 통계분석을 수행하였으며, 이를 통해 도시화에 의해 재해위험도가 크게 증가하였음을 보인 바 있다.

국내에서도 관련 연구사례를 다수 찾아볼 수 있다. 김정곤 외(2006)는 SWAT 모형을 이용하여 도시화로 인한 지표유출량의 증가와 지하수 유출량의 감소가 뚜렷하며, 그 차이는 강우량이 적고 증발산량이 많은 갈수년(渇水年)에 더 크게 나타났다음을 밝힌바 있다. 이러한 결과는 불투수면의 증가 영향이 우기 동안의 홍수피해 증가와 갈수기 동안의 하천 건천화 문제를 더욱 가중시키는 것으로 이해할 수 있다. 허창환(2003), 박민지 외(2005), 이승중 외(2005), 최정화 외(2009)도 도시화로 인해 유출특성이 더욱 극단적으로 변화함을 보인 바 있다.

기존 연구에서는 주로 불투수면에 의한 유역응답의 차이를 평가한 사례가 대부분이다. 그러나 도시유역의 유출특성을 대표하는 인자가 불투수면임에도 불구하고, 유출 및 홍수피해 저감효과를 목적으로 불투수면 관리 문제를 다룬 실증적 사례는 찾아보기 힘들다. 단지, 불투수면의 확대와 자연재해 피해액과의 상관성을 다룬 사례만 있을 뿐이다(최충익, 2003; 한국환경정책·평가연구원, 2011; 심재현·김자은, 2012). 이는 도시유역에서 불투수면 관리에 대한 인식이 아직까지 치수(治水) 측면에서 이뤄지지 못하고 있기 때문이다. 또 다른 문제는 투수성 포장, 투수 블록 등과 같이 불투수면을 최소화하기 위한 기법들(우수유출저감 시설 등)이 유역단위에서 평가되지 못하고 있다는 점이다. 이로 인해 유역 전역에서의 효과와 대책 마련을 논하기에는 한계가 있다. 관련 연구사

례를 살펴보면, 대부분이 개개 시설물(투수성 포장, 투수 블록, 침투 트렌치, 침투 통 등)별로 유출 저감 효과를 파악한 것이며, 대상면적 역시 시설물단위 또는 작은 소유역을 대상으로 하고 있다(이승중 외, 2005; 소방방재청, 2009; 이수형 외, 2012). 사실 개별 시설물들을 수문모형에 정교하게 고려하는 것은 대단히 어려운 일이다(유철상 외, 2010). 이를 극복하기 위한 단순한 방법은 시설물별로 우수유출저감 효과의 정량적 지표를 도시유출모형의 매개변수로 이용하는 것이다(Carter and Rasmussen, 2006; 유철상 외, 2010; 박창열 외, 2013). 또 다른 방법은 불투수면의 저감량을 직접 고려해서 유역단위의 유출모형을 구성하는 것이다. 이렇게 된다면, 유출저감을 목적으로 토지이용을 계획하거나 우수의 지역별 분담량을 결정할 때에 보다 쉽게 활용할 수 있을 것이다. 아울러 유역 전역에서 물순환 체계의 회복 정도를 평가하는데도 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

이에 본 연구에서는 유역단위의 토지이용 관리 측면에서 불투수면 규제에 의한 유출 및 침수피해 저감효과를 살펴보고, 이를 통해 시사점을 도출하여 보다 실용적인 결과를 제시하고자 한다. 이를 위해 3가지 불투수면 규제 시나리오를 작성하고, 서울시의 기성시가지 유역을 대상으로 유출모의를 수행하였다.

## II. 연구방법

### 1. 대상유역에의 적용

#### 1) 도시유역 유출모의를 위한 XP-SWMM 모형

본 연구의 대상유역은 시가화 비율이 높은 도시유역으로 불투수 면적이 크고, 인위적인 배수계

통(drainage system) 등으로 인해 자연 하천유역과 유출특성이 크게 다르다. 이러한 특성을 고려할 수 있는 도시유출모형으로 SWMM 모형이 널리 이용되고 있으며, 본 연구에서는 2차원 침수 모델링이 가능한 XP-SWMM 10.0 모형을 이용하였다.

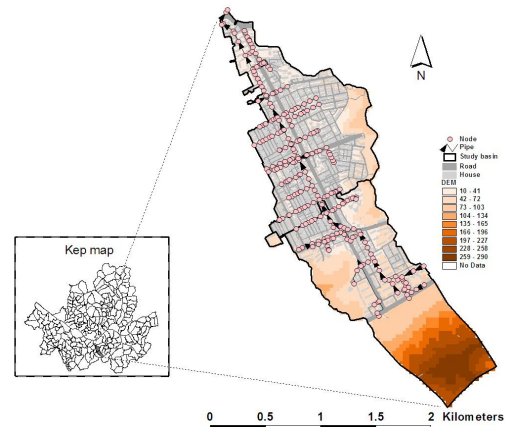
XP-SWMM 모형은 미국 XP Software사에서 EPA-SWMM 모형을 위해 윈도우 환경으로 개발한 것으로, 기본적인 해석방법이나 모형의 구조는 SWMM 모형과 동일하다. SWMM 모형은 기본적으로 도시유역이나 인위적인 배수계통을 갖는 유역에 대한 강우-유출과정을 해석하는 도시유출 모형이며, 1971년 미국의 EPA와 Metcalf and Eddy Inc.의 공동연구로 도시지역 하수시스템 내의 유량과 수질을 모의하기 위해 개발되었다. 기본적으로 호우에 의해 발생하는 유출량과 오염물질에 대한 지표면 및 지표하 흐름, 배수관망에서의 유출량 추적, 저류량 산정, 수질계산 등의 모의가 가능하다. 보다 자세한 내용은 Lossman(2004)에서 자세히 살펴볼 수 있다.

## 2) 대상유역 및 XP-SWMM 모형 구축

본 연구에서는 서울시의 전형적인 기성시가지 유역을 대상으로 하였다. 대상유역은 서울시 상습 침수구역 중 하나이며, 최근 2010, 2011년 집중호우에도 침수피해가 발생한 바 있다(서울특별시, 2011b). 대상유역의 위치는 <그림 1>과 같다.

도시유출모형은 대상유역의 배수시설을 적절히 반영하고, 침수취약지역과 통수능 부족구간이 적절히 나타날 수 있도록 구성되어야 한다. 이에 본 연구에서는 대상유역에 대한 하수관망도와 수치지형도(1:1,000)를 수집하여 XP-SWMM 모형을 구축하였다. 대상유역에 대한 DEM(5m×5m)과 도시유출모형 구축 현황은 <그림 1>과 같다. 이때 관망

의 최소 관경은 600mm로 설정하였으며, 이를 근거로 268개의 관망과 node를 모형에 이용하였다(<그림 1> 참조).



<그림 1> 대상유역의 위치와 DEM

본 연구에서 고려한 대상유역의 면적은 294ha이며, 2개의 배수분구 지역에 해당한다. 하류부의 방류조건은 유출구가 소하천으로 유입되는 지역의 직상류에 위치하고, 배수가 원활히 이뤄지는 지역으로 판단하여 자유단 경계조건을 이용하였다. 아울러 본 연구의 목적은 도시유역에서 불투수면의 규제 영향을 파악하는데 있으므로 하수관망도를 제외한 다른 제약사항들은 고려하지 않았다.

## 3) 유출모의를 위한 강우조건

지속기간과 재현기간별 확률강우량은 「확률강우량도 개선 및 보완 연구」(국토해양부, 2011)의 빈도해석 결과를 이용하였다. 서울 지점에 대한 최적 확률분포형은 Gumbel 분포형이며, 다음과 같은 6차 다항식 형태의 확률강우강도식을 이용하였다.

$$\ln(I) = a + b\ln(t) + c(\ln(t))^2 + d(\ln(t))^3 + e(\ln(t))^4 + f(\ln(t))^5 + g(\ln(t))^6 \quad (1)$$

여기서  $I$ 는 강우강도(mm/hr),  $\ln$ 은 자연대수,  $a, b, c, d, e, f, g$ 은 6차 다항식의 계수,  $t$ 는 지속기간(hr)이다. 서울 지점에 대해 위 6차 다항식에 적합시킨 결과는 <표 1>에 정리하였다. 본 연구에서는 유역규모를 고려하여 강우 지속시간 1시간, 서울지역의 도시방재성능목표에 해당하는 재현기간 30년 빈도를 이용하였다(소방방재청, 2010).

<표 1> 서울 지역 확률강우강도식의 매개변수(국토해양부, 2011)

매개변수	재현기간(년)			
	10	30	50	100
$a$	4.299	4.513	4.598	4.701
$b$	-0.403	-0.387	-0.382	-0.375
$c$	-0.05984	-0.06768	-0.07027	-0.07365
$d$	-0.01566	-0.01673	-0.01721	-0.01748
$e$	0.00377	0.00458	0.00485	0.00519
$f$	0.00053	0.00058	0.00061	0.00060
$g$	-0.00012	-0.00014	-0.00015	-0.00016

## 2. 불투수면 규제 시나리오 설정

### 1) 불투수면 규제에 의한 유출곡선지수

불투수면 규제에 의한 유출저감효과를 파악하기 위해서는 불투수면 규제의 영향을 반영할 수 있도록 유출모형을 구성해야 한다. 가장 단순하게는 불투수면을 투수면으로 전환할 경우에 유역 특성인자의 변화량(유출곡선지수 또는 유출계수 등의 저감량)을 이용할 수 있다. 이는 아스팔트 등의

불투수면을 투수성 재료나 녹지공간으로 전환하였을 경우의 유출지표의 차이를 나타낸다. 그러나 국내의 관련 연구에서는 이러한 차이를 정량적으로 제시한 사례를 찾아보기 힘들다. 미국의 경우를 보면, 미국 환경청에서 LID<sup>1)</sup> 기법의 설계를 위해 LID 기법 적용 전·후에 따른 유출곡선지수의 차이를 정량적 지표로 제시하고 있다(<표 2> 참조). <표 2>에서 볼 수 있듯이, 불투수면을 어느 투수성재료로 변환하느냐에 따라 유출곡선지수의 차이가 있음을 알 수 있다. 물론 경우에 따라서는 매우 큰 차이를 나타내기도 하지만, 본 연구에서는 대상유역의 대부분이 아스팔트와 콘크리트 포장지역임을 감안하여 불투수면 규제 후의 유출곡선지수를 '70'으로 가정하였다.

<표 2> LID 적용 전·후의 수문학적 토양군별(A/B/C/D) 유출곡선지수(U.S. EPA, 2008)

구분	LID 적용 전 CN (불투수면)	LID 적용 후 CN (투수면)
차도 (driveway)	98/98/98/98	70/80/85/87
일반도로 (street)	98/98/98/98	70/80/85/87
보도 (sidewalk)	98/98/98/98	70/80/85/87
주차장 (parking lot)	95/95/95/95	46/65/77/82
테라스 (patio)	95/95/95/95	76/85/89/91
지붕 (roof)	95/95/95/95	85/85/85/85 <sup>2)</sup>

### 2) 불투수면 규제 시나리오 구성

본 연구에서 고려하는 불투수면 규제 시나리오는 적용 영역에 따라 유역 전체를 대상으로 한 경우, 유역을 입지에 따라 상·중·하류부로 구분한

1) 저영향개발(Low Impact Development, LID)은 개발이전 상태에 가까운 유출 조건을 만들기 위한 토지이용 계획 및 도시개발 기법을 의미함.

2) 지붕 투수면의 경우 옥상녹화(green roof)에 해당함.

경우, 토지이용별로 규제한 경우로 구분할 수 있다. 이는 전략적으로 어느 지역의 불투수면을 규제하는 것이 가장 효과적인지 파악해보기 위함이다. 물론 유역 전체를 대상으로 한 경우는, 현실적으로 실현 가능성이 높진 않지만, 불투수면 규제의 최대 효과를 파악해보기 위해 적용한 사례로 이해할 수 있다.

그러나 불투수면 규제는 막대한 예산비용 문제 외에도 지구단위(또는 유역단위)의 관리가 필수적이다 보니 이해당사자들 간의 합의 문제(타인의 안전을 위해 불가피하게 자신의 비용을 지출하게 되는 문제 등) 등 보다 현실적인 문제들이 산재해 있는 것이 사실이다. 본 연구에서는 이러한 문제들로 인한 영향을 고려하고, 보다 현실적인 수준에서 효과를 살펴보기 위해 각 시나리오에 불투수면의 전환면적 비율을 적용하고자 한다. 다시 말해 불투수 면적을 투수면으로 전환할 때 대상면적의 전환 비율을 각각 10, 30, 50, 100%로 적용하여 그 효과를 파악하였다.

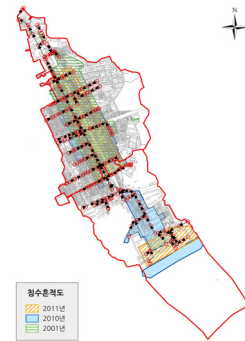
### III. 결과 및 고찰

#### 1. 불투수면 규제 시나리오에 의한 유출 및 침수피해 저감 효과

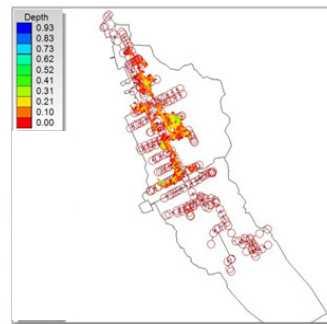
##### 1) 유출모형 검증

불투수면 규제의 영향을 파악하기에 앞서 본 연구에서 구축한 유출모형에 대한 검증이 필요하다. 사실 모형의 검증을 위해서는 강우와 수위 자료의 관측치를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나 본 연구에서와 같은 도시유역에서는 관망 내 수위 자료의 수집이 용이하지 못하다. 본 연구의 궁극적인 목적이 불투수면 규제에 의한 유출 및 침수

피해 저감효과를 살펴보는 것이므로, 대상유역의 과거 침수흔적도를 조사하여 본 연구에서 구축한 모형의 침수도의 결과와 비교·검토하였다. 대상유역의 침수흔적도와 XP-SWMM 10.0 모형을 이용한 2차원 침수도의 결과는 <그림 2>와 같다.



(a) 주요 침수피해 발생지역(서울특별시, 2011b)



(b) 2011년 호우사상을 적용한 침수도의 결과

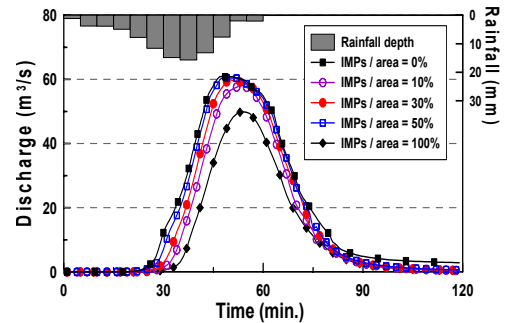
<그림 2> 침수도의 비교를 통한 유출모형의 검증

서울시 대부분의 하수관거의 설계빈도는 5~30년 빈도이다. 그러나 시간당 90mm 이상(대략 50년 빈도)의 호우가 발생했던 2010년의 경우에도 침수피해는 대상유역의 상류지역에 비해 중하류 지역에 집중되어 있음을 알 수 있다. 특히, 유역경사로 인해 우수의 집중도가 높은 간선 구간에서 침수면적이 분포되어 있음을 알 수 있다. 2011년 침수범람 지역을 보면, 시가지 상류부에 침수피해

흔적을 확인할 수 있는데, 이는 대상유역 상류부에서 발생한 산사태로 인한 토사유입의 영향으로 확인되었다. 이러한 특수한 상황을 제외하면, <그림 2>에서 볼 수 있듯이 유출모의를 통한 침수발생 지역과 통수능 부족구간 지역은 기 발생하였던 침수피해지역과 전체적으로 유사함을 알 수 있다. 이에 본 연구에서 구축한 유출모형에 불투수면 규제 시나리오를 적용하여 유출모의를 수행하였다.

## 2) 유역 전체를 대상으로 불투수면을 규제한 경우

먼저 유역전체를 대상으로 불투수면을 규제한 경우를 살펴보자. 사실 유역 전역의 불투수면을 규제할 수만 있다면, 도시지역의 치수문제와 물순환 체계의 회복 측면에서 매우 효과적인 것이다. 그러나 시가화율이 매우 높고, 고밀도에 높은 지가를 형성하고 있는 기성시까지 유역의 경우 유역 전역에서 불투수율을 규제한다는 것은 현실적으로 불가능한 일이다. 이에 본 연구에서는 실현가능성을 염두에 두고 불투수면을 투수성 재료로 변환하는 면적비율을 10%, 30%, 50%, 100%를 고려함으로써 각각의 경우가 어느 정도의 효과를 갖는지 파악해보았다. <그림 3>은 유역전체를 대상으로 불투수면을 규제한 경우 유출 및 침수피해 저감효과를 나타낸 것이다.



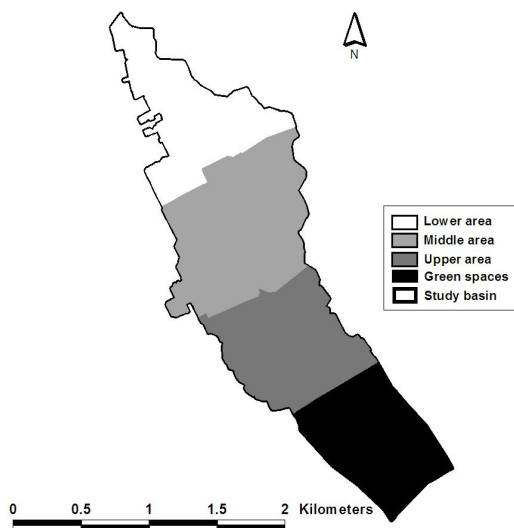
<그림 3> 유역전체를 대상으로 불투수면 규제한 경우 유출수문곡선 변화(유역출구)

<그림 2>에서 볼 수 있듯이 대상유역에 30년빈도의 확률강우량을 적용할 경우 유역 중하류 지역의 관거에서 월류가 발생함을 알 수 있다. 이에 대한 유출 특성과 월류 발생 node의 수는 <표 3>에 정리하였다. <표 3>에서 면적비율 0%는 불투수면을 규제하지 않은 경우에 해당한다. 이 결과를 규제 시나리오 적용 후와 비교해보면, 유역 전역을 대상으로 불투수면 규제가 가능하다면 유출저감뿐만 아니라 침수피해 역시 크게 저감할 수 있음을 알 수 있다. 적용비율에 따라 살펴보면, 적용비율 100%의 경우 불투수면 규제의 최대 저감효과는 유출체적이 약 36%, 첨두유량이 약 18% 정도 저감되는 것으로 나타났다. 적용비율 50%의 경우에는 즉, 유역 전체의 절반에 해당하는 면적을 규제하면, 유출체적이 약 20%, 첨두유량의 약 5% 저감효과를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결

<표 3> 유역전체를 대상으로 불투수면 규제한 경우 유출 및 침수피해 저감효과(유역출구)

Scenario type	Impervious area ratio (%)	Runoff volume (m³)	Peak flow (m³/s)	Time of peak flow (min.)	Number of overflow nodes (EA)
All basin	0	126,630	60.8	235	37
	10	121,014	60.7	240	33
	30	111,954	59.9	250	28
	50	101,658	58.1	270	19
	100	81,198	49.9	270	10

과는 치수를 목적으로 불투수면 규제방안을 고려할 경우 적용면적에 따라 그 효과를 담보할 수 있음을 나타낸다. 그러나 서울시와 같이 시가화율이 높은 기성시가지의 경우에는 보다 현실적인 문제들이 산재하여 유역전체를 대상으로 하는데 한계를 가질 수밖에 없다. 이에 보다 전략적인 지역적 선택이 필요할 것으로 보인다.



〈그림 4〉 유역 내 입지에 따른 유역구분

### 3) 유역 내 입지에 따라 불투수면을 규제한 경우

다음은 유역을 입지에 따라 구분하여 불투수면을 규제한 경우에 대해 살펴보자. 본 연구의 대상 지역은 크게 녹지 특성을 포함한 산지지역과 시가화율이 높은 도심지역으로 구분된다. 산지지역의 경우는 불투수율이 매우 낮기 때문에, 불투수율이 높은 도심지역을 대상으로 집수면적과 유역경사 및 관망의 길이를 고려하여 유역을 입지에 따라 상·중·하류부로 구분하였다. 이는 〈그림 4〉에 나타난 바와 같이 크게 4개의 지역으로 구분된다.

〈그림 4〉와 같이 입지에 따라 유역을 구분하게

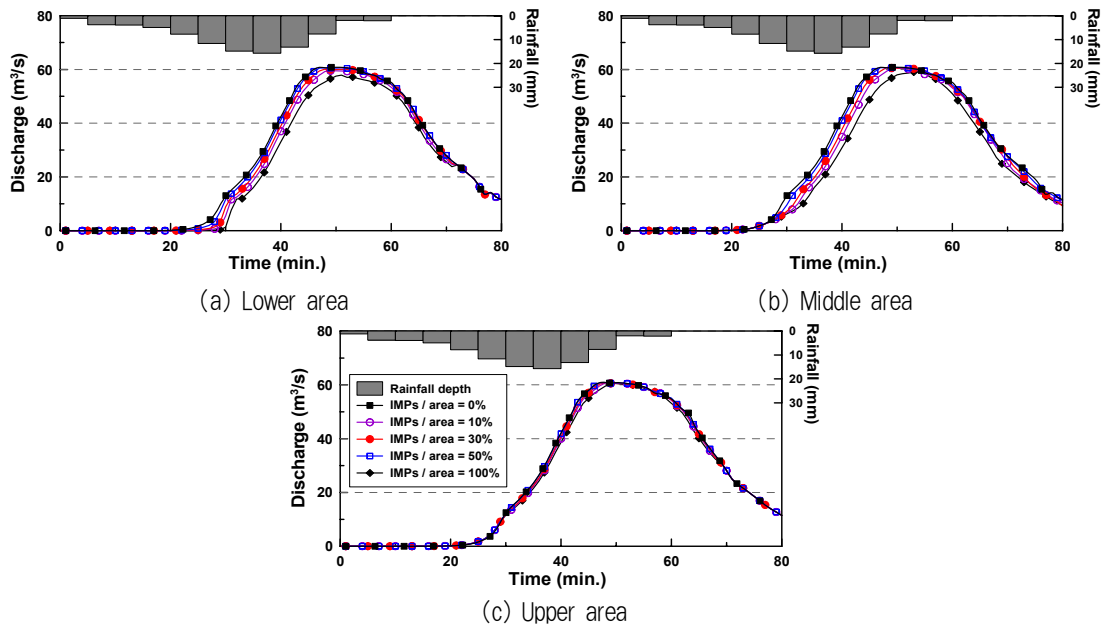
되면, 최상단의 녹지지역(64ha)은 불투수율이 0%에 가깝고, 상류부 지역(69ha)은 58.7%, 중류부 지역(96ha)은 65.2%, 하류부 지역(64ha)은 72.2%가 된다. 이는 불투수면의 규제 면적이 하류부 지역에서 가장 크게 적용됨을 의미한다. 단순히 해당지역의 규제 효과가 가장 클 것으로 예상해볼 수 있지만, 도시유역에서의 유출응답은 다른 인자들의 영향이 작용하기 때문에 유출모의결과를 통해 살펴볼 필요가 있다. 불투수면을 지역별로 규제한 경우 도시유출모형의 모의결과는 〈표 4〉와 〈그림 5〉와 같다.

유역을 입지에 따라 구분해서 불투수면을 규제하게 되면, 유출 규모의 저감효과는 유역 도달시간에 따라 달라진다. 즉, 상류부에서의 초기 유출량을 저감시킴에 따라 유역 출구에서의 수문곡선의 첨두유량 부분을 저감시키게 된다. 이러한 전체적인 상황은 유역 형상에 따라 달라질 수도 있다. 그러나 홍수취약지역 주변의 수문곡선을 파악하고 유역 도달시간 및 첨두유량 발생시간을 고려한다면, 어느 지역에서의 불투수면을 규제하는 것이 보다 효율적인지 쉽게 파악할 수 있을 것으로 보인다. 앞서 언급한 바와 같이 불투수면 규제 전의 결과는 〈표 3〉의 면적비율 0%인 경우에 해당한다. 이 결과와 유역입지에 따라 불투수면을 규제한 경우를 비교하여 살펴보면, 하류부와 중류부 지역에 대한 적극적인 규제가 가장 효율적임을 알 수 있다. 상류부 지역에 대해 규제한 결과를 보면, 그 효과가 상대적으로 미미한 것으로 나타났다. 이는 상류부 지역 규제의 영향이 내배수 시설의 기능을 이미 상실한 후에 도달하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 호우 초기에 우수의 유역 분담저류를 통해 배수시설의 부담을 최소화시키는 것이 불투수면 규제효과를 증대시키는데 도움이



〈표 4〉 유역 내 입지에 따른 불투수면 규제에 따른 유출 및 침수피해 저감효과(유역출구)

Scenario type	Impervious area ratio (%)	Runoff volume (m <sup>3</sup> )	Peak flow (m <sup>3</sup> /s)	Time of peak flow (min.)	Number of overflow nodes (EA)
Lower area	10	124,020	60.6	240	34
	30	120,744	60.1	240	33
	50	117,456	59.5	245	25
	100	111,168	57.9	255	22
Middle area	10	123,792	60.7	235	35
	30	120,678	60.7	240	34
	50	117,888	60.6	250	32
	100	110,250	59.2	270	27
Upper area	10	125,532	60.8	240	37
	30	124,362	60.7	240	35
	50	123,558	60.7	250	35
	100	121,794	60.6	250	35



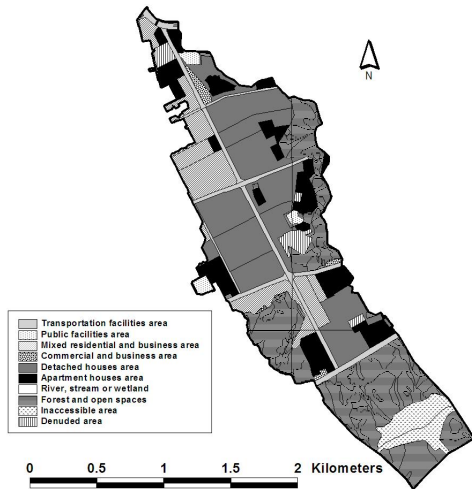
〈그림 5〉 유역 내 입지에 따른 불투수면 규제에 따른 유출수문곡선 변화(유역출구)

될 것으로 보인다.

#### 4) 토지이용별로 불투수면을 규제한 경우

마지막으로 토지이용별로 불투수면을 규제한 경우를 살펴보자. 앞서 언급한 바와 같이, 불투수면을 방재성능 향상을 목적으로 규제한다는 것은

현실적으로 어려움이 많이 따른다. 이에 본 연구에서는 토지이용별로 각각의 효과를 파악하여 보다 전략적인 대책을 수립하는데 도움을 얻고자 한다. 이를 위해 대상유역 내 토지이용 현황을 조사하였으며, 〈그림 6〉과 〈표 5〉에 정리하였다.



〈그림 6〉 대상유역 내 토지이용 현황

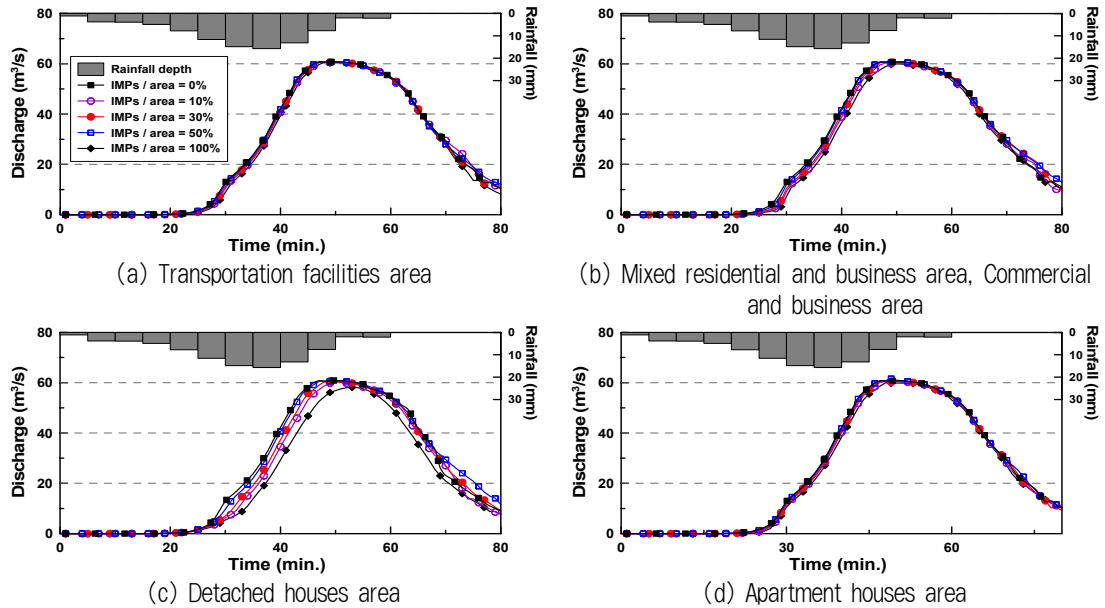
〈표 5〉 토지이용별 유역면적 및 불투수율

Land use	Area (m <sup>2</sup> )	Area ratio (%)	Impervious ratio (%)
Transportation facilities area	197,429.5	6.7	100.0
Public facilities area	34,087.4	1.2	26.4
Mixed residential and business area	344,288.3	11.7	89.3
Commercial and business area	25,453.0	0.9	91.8
Detached houses area	878,370.6	30.1	82.0
Apartment houses area	341,145.1	11.6	70.4
River, stream or wetland	92.9	0.0	0.0
Forest and open space, inaccessible area, denuded area	1,112,338.4	37.9	0.0
Total	2,933,205.4	100.0	51.1

본 연구에서 대상으로 하는 유역의 경우 불투수 지역이 없는 녹지 및 오픈스페이스, 특수지역, 나지를 제외하면, 토지이용별 유역면적은 단독주택지>주거상업혼합지>공동주택지>교통시설지>공공용도지>상업 및 업무 혼합지 순으로 크게 나타난다. 토지이용별 평균불투수율은 교통시설지가

100%로 가장 높고, 상업 및 업무지>주거상업 혼합지>단독주택지>공동주택지>공공용도지 순으로 높은 것으로 나타났다. 대상유역 전체적으로는 51.1로 나타났으며, 서울시 전체의 평균 불투수율인 47.7과 유사한 것을 알 수 있다(서울시정개발연구원, 2011). 토지이용별 면적과 평균 불투수율을 동시에 고려한다면, 단독주택지, 주거상업 혼합지, 공동주택지, 교통시설지가 주요 규제대상이 될 것으로 보인다. 따라서 토지이용별 규제 시나리오는 크게 1. 교통시설지, 2. 주거상업, 상업업무지, 3. 단독주택지, 4. 공동주택지 등 4가지로 구분하였다. 각 시나리오에 대한 유출모의 결과를 정리하면 〈그림 7〉과 〈표 6〉과 같다.

〈표 6〉에서 볼 수 있듯이 토지이용별로 불투수면을 규제할 경우 지배면적이 가장 큰 단독주택지를 대상으로 할 때 가장 큰 효과가 있는 것으로 나타났다. 여기서 주목해야 할 부분은 지배면적이 유사한 공동주택지와 주거상업·상업업무지에 대한 적용 결과이다. 〈그림 7〉의 유출수문곡선의 차이에서 알 수 있듯이 주거상업·상업업무지에 대한 불투수면 규제 효과가 상대적으로 크게 나타났다. 이는 이들 지역의 공간적 분포 특성에 의한 것으로 이해할 수 있다. 〈그림 6〉에서 토지이용별 공간적 분포 특성을 비교해 보면, 공동주택지의 경우 두 가지 특성이 뚜렷함을 알 수 있다. 첫 번째는 공동주택지가 공간적으로 유역 상단지역 즉, 분수계 주변에 배치되어 있다는 점이고, 두 번째는 유역 전역에 산발적으로 분포되어 있다는 점이다. 이렇다 보니 유출저감효과 역시 상대적으로 미미해질 수밖에 없다. 반대로 주거상업·상업업무지의 경우는 주요 간선을 중심으로 밀집된 형태로 배치되어 있음을 알 수 있다. 이러한 차이는 도시지역에서 불투수면 규제전략을 수립할 때 전략



〈그림 7〉 토지용도별 불투수면 규제에 따른 유출수문곡선 변화(유역출구)

〈표 6〉 토지이용별로 불투수면을 규제한 경우 유출 및 침수피해 저감효과(유역출구)

Scenario type	Area ratio (%)	Runoff volume (m³)	Peak flow (m³/s)	Time of peak flow (min.)	Number of overflow nodes (EA)
Transportation facilities area	10	125,184	60.8	235	36
	30	124,602	60.7	235	36
	50	123,762	60.6	240	36
	100	122,064	60.6	240	35
Mixed residential and business area, Commercial and business area	10	126,228	60.7	235	35
	30	124,302	60.8	240	35
	50	122,658	60.4	250	35
	100	119,490	59.9	250	32
Detached houses area	10	123,816	60.7	235	36
	30	119,748	60.7	245	34
	50	116,448	60.5	250	29
	100	105,216	58.1	265	18
Apartment houses area	10	126,132	61.6	235	37
	30	124,890	60.6	240	35
	50	123,840	60.4	250	35
	100	121,566	60.0	250	34

적 입지선정의 중요성을 보여준다. 따라서 재해저감을 위한 도시지역의 불투수면 규제지역은 토지이용의 공간적 배치 현황을 적절히 고려하여 선정되어야 할 것이다.

## 2. 유출모의 결과를 통해서 본 불투수면 규제의 시사점

유역 내 토지이용은 다양한 형태로 구성되어

있다. 특히, 도시구역에서 토지이용은 불투수면의 분포와 밀접한 관련이 있다. 이에 본 연구에서는 불투수면 규제를 통한 치수효과를 검증하고자 하였다. 이를 위해 불투수면 규제 시나리오를 작성하였으며, 각 시나리오에 대한 유출모의 결과를 통해 도시구역에서 토지이용 규제에 따른 재해저감효과를 살펴보았다. 이를 보다 명확하게 파악하기 위해 앞서 분석한 각 시나리오별 유출모의 결과를 유출저감율로 변환하여 <표 7>에 정리하였다.

<표 7>에 정리한 저감율은 대상면적에 적용비율을 50%로 한 경우에 해당한다. 시나리오별로 저감율을 비교해보면, 적용면적이 가장 큰 유역전체를 대상으로 한 경우가 가장 큰 효과를 나타낼 수 있다. 유역을 상중하로 구분한 경우는 하류와 중간 유역에서 뚜렷한 효과를 나타낼 수 있으며, 이는 불투수면 규제의 효과가 홍수 도달시간에 따라 달라질 수 있음을 나타낸다. 즉, 유역 전역에서 우수를 분담하기 위한 우수유출저감시설, 빗물이용시설 등의 위치를 적절히 고려할 경우 보다 효과적인 대책을 마련할 수 있음을 의미한다. 불투수면을 토지이용별로 규제한 경우는

적용면적이 가장 큰 단독주택지 지역에서 효과가 가장 크게 나타났으며, 주거상업지, 상업업무지, 공동주택지, 교통시설지 순으로 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 시가화율이 매우 높은 서울 기성시까지 유역의 경우 단독주택지에 대한 불투수면 관리방안이 마련되어야 할 것으로 보인다. 그러나 <표 7>에서 볼 수 있듯이 불투수면 규제에 의해서도 침투유량을 저감하기에는 여전히 한계가 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 재해위험지역에 대한 수방대책 계획시에 유출총량 저감, 침수피해 저감과 물순환 체계 개선 등을 목적으로 한 불투수면 관리와 같은 비구조적 대책에 더불어, 침투유량 및 침투유량 발생시간 지연 등을 위한 구조적 대책이 병행되어야 함을 나타낸다.

본 연구에서는 불투수율을 기준 이하로 규제함으로써 얻을 수 있는 재해저감효과를 살펴보았으며, 적용면적의 규모와 위치에 따라 치수효과가 크게 달라질 수 있음을 확인하였다. 전체적으로 보면, 치수를 목적으로 한 불투수면 관리는 기본적으로 대상지역의 충분한 가용지 확보, 재해위험지역과 그 영향권의 지역적 특성 고려, 토지이용의 공간분포 특성 고려 등 보다 전략적인 규제지

<표 7> 불투수면 규제에 의한 유출 및 침수피해 저감율

(단위 : %)

	Scenario type							
	All basin	Position of area			Land use type			
		Lower area	Middle area	Upper area	Transportation facilities area	Mixed residential and business area, Commercial and business area	Detached houses area	Apartment houses area
Runoff volume	19.7	7.2	6.9	2.4	2.3	3.1	8.0	2.2
Peak flow	4.5	2.2	0.3	0.3	0.4	0.7	0.6	0.8
Time of peak flow	-14.9	-4.3	-6.4	-4.3	-2.1	-6.4	-6.4	-6.4
Number of overflow nodes	48.6	32.4	13.5	5.4	2.7	5.4	21.6	5.4

역 선정을 통해 이뤄져야 할 것으로 보인다. 이와 같은 불투수면 관리 대상지는 크게 신시가지와 기성시가지로 구분할 수 있다. 먼저, 계획단계에서부터 불투수율을 규제할 수 있는 신시가지 구역의 경우에는 물순환 체계의 보전을 목적으로 토지를 계획하고, 기존 불투수율을 유지하기 위한 단지 및 건축물 배치, 도로 선정 및 하천 횡단시설 설계, 공원 녹지 및 주차장 배치 등이 수행되어야 한다. 그러나 고밀화된 기성시가지 구역의 경우에는 현실적 제약이 많은 것이 사실이다. 단순하게는 높은 지가와 같은 경제적 측면에서 생각해볼 수 있지만, 규제 대상지역 주민들과의 이해관계 문제 등 보다 현실적인 문제들이 많을 것이다. 이와 같은 문제들은 각 규제에 상응하는 건축기준 완화, 건축비 지원 등과 같은 실질적 인센티브 제도를 통해 일부 해결될 수 있으리라 판단된다. 그러나 이러한 문제들을 배제하고서라도, 아스팔트와 콘크리트로 뒤덮힌 도시지역을 어떤 식으로 투수성 재료로 전환하느냐는 또 다른 문제가 된다. 물론 이와 관련된 요소기술의 개발이 활발히 진행되고 있는 실정이지만, 이에 대한 적용성은 아직 검증 단계에 있는 수준이다. 향후 이들 요소기술들의 효과를 유역단위에서 검증하고, 이들 기술의 최적 조합 및 배치방안을 마련하고, 시범유역을 확대 운영하는 등 보다 적극적인 접근방안을 통해 다양한 측면에서의 효과를 입증해 나가야 할 것으로 보인다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 서울시에 위치한 기성시가지 유역을 대상으로 불투수면 규제에 의한 유출 및 침수피해 저감효과를 살펴보았다. 이를 근거로 불투

수면의 관리방향을 제시하고자 하였다. 이를 위해 기성시가지에서 적용 가능한 불투수면 규제 시나리오를 작성하였으며, 각각의 시나리오에 대한 유출모의 결과를 비교하여 그 특성을 살펴보았다. 그 결과, 불투수면은 유출 및 침수피해 저감을 위한 관리대상 인자임을 확인하였으며, 대상지역에서 불투수면 규제를 통한 최대 유출저감효과는 유출체적의 약 20%, 침투유량의 경우 약 15% 정도임을 알 수 있었다. 또한 도시지역에서 불투수면 규제전략을 수립할 때 전략적 입지선정의 중요성을 확인하였으며, 토지이용의 공간적 배치 현황과 재해취약지역에 대한 홍수 도달시간 등을 적절히 고려해야 함을 알 수 있었다. 이와 같은 불투수율 관리는 궁극적으로 도시하천의 건천화 예방, 각종 오염물질의 하천유입 저감, 하천생태계 보전 등에도 도움이 될 것으로 기대된다.

그러나 불투수면을 최소화하기 위한 요소기술들이 아직까지 개발 및 적용단계에 있는 실정이며, 법·제도적 장치가 마련되어 있지 않아 가용지를 확보하기에는 한계가 있는 것이 사실이다. 따라서 향후 관련 법·제도 기준을 체계적으로 마련하고, 이를 근거로 보다 적극적인 불투수율 관리방안을 모색해 나가야 할 것이다. 아울러 본 연구에서는 불투수면 규제에 의한 치수효과를 검증해보는데 중점을 두고 있다. 이로 인해 불투수율 규제를 위한 요소기술들의 최적조합 및 배치방안을 마련하고, 기존의 구조물적 수방대책과 비교 논의하기에는 한계가 있음을 밝히는 바이다. 향후 최적화기법을 도입하여 각 기술들의 조합기법을 마련하고, 기존의 수방대책들과 경제성 측면에서의 비교 논의 등이 이뤄진다면, 도시유역에서 보다 효율적인 대안을 제시할 수 있을 것이다.

## 참고문헌

- 국토해양부, 2011, 「확률강우량도 개선 및 보완 연구」.
- 김정곤·손경호·노준우·장창래·고익환, 2006, “SWAT 모델을 이용한 갑천유역에 대한 수문 특성 분석 및 도시화 영향 평가”, 『한국수자원학회논문집』, 39(10): 881~890, 한국수자원학회.
- 박민지·권형중·김성준, 2005, “HSPF 모델을 이용한 토지 피복변화에 따른 유출 변화”, 『한국수자원학회논문집』, 38(6): 495~504, 한국수자원학회.
- 박창열·유철상·신상영·손은정, 2013, “지구내 저류시설의 유출저감효과 정량화 및 적정용량 결정”, 『한국방재학회논문집』, 13(4): 257~266, 한국방재학회.
- 서울시정개발연구원, 2011, 「토지이용특성과 침수피해지역 간의 관계 연구」.
- 서울특별시, 2011a, 「우수유출저감시설 타당성 조사 및 기본계획 보고서」.
- 서울특별시, 2011b, 「2011 서울시 재난위험도 평가 및 활용방안」.
- 소방방재청, 2009, 「내배수 침수재해 저감기술 개발-내배수 홍수분담 최적화기술 개발」.
- 소방방재청, 2010, 「기후변화를 고려한 도시 방재 성능 목표 설정 방안 연구」.
- 신상영·이석민·박민규, 2011, “서울의 침수 피해특성과 수방정책방향”, 『한국방재학회지』, 11(3): 4~10, 한국방재학회.
- 심재현·김자은, 2012, “토지이용특성과 자연재해 피해액의 상관성 분석”, 『한국산학기술학회논문지』, 13(9): 4319~4325, 한국산학기술학회.
- 엄정섭, 2004, “도시의 불투수면 총량규제에서 원격탐사와 GIS의 활용”, 『환경영향평가』, 13(5): 263~276, 한국환경정책·평가연구원.
- 오동근·정세웅·류인구·강문성, 2010, “SWMM을 이용한 도시화유역 불투수율 변화에 따른 강우유출특성 분석”, 『수질보전 한국물환경학회지』, 26(1): 61~70, 한국물환경학회.
- 유철상·김경준·박민규·윤정수, 2010, “유출곡선지수를 이용한 소규모 저류시설의 유출저감효과 정량화”, 『한국방재학회논문집』, 10(3): 109~118, 한국방재학회.
- 이수형·김영오·이상호·이길성, 2012, “분리형 투수블럭의 우수유출 저감 효과 분석”, 『한국방재학회논문집』, 12(6): 157~162, 한국방재학회.
- 이승중·김영오·이상호·이길성, 2005, “WEP 모델을 이용한 도립천 유역 물순환 모의”, 『한국수자원학회논문집』, 38(6): 449~460, 한국수자원학회.
- 최정화·이정주·권현한, 2009, “조경천 유역의 도시화에 따른 유출 변화 추이 분석”, 『한국습지학회지』, 11(3): 161~169, 한국습지학회.
- 최지용·고은주, 2008, “유효 및 총불투수율의 산정과 유역관리에서의 활용방안”, 『환경정책연구』, 7(3): 121~140, 한국환경정책·평가연구원.
- 최지용·김병익·박백수·정은성, 2008, “물 환경관리를 위한 불투수면 지표의 적용성 연구”, 『수질보전 한국물환경학회지』, 24(6): 767~772, 한국물환경학회.
- 최충익, 2003, “도시적 토지이용의 변화가 도시의 자연재해 취약성에 미치는 영향에 관한 연구: 경기도를 사례로”, 『대한 국토계획학회지』, 38(2): 35~48, 대한 국토도시계획학회.
- 한강수계관리위원회, 2006, 「유역관리지표 적용을 위한 기초조사 III」.
- 한강수계관리위원회, 2007, 「수계별 유역의 불투수율 조사 및 저감방안 연구」.
- 한국환경정책·평가연구원, 2011, 「기후변화 적응형 도시리뉴얼 전략 수립: 그린인프라의 방재효과 및 적용방안」.
- 허창환, 2003, “유역의 도시화에 따른 유출변화특성”, 『한국수자원학회논문집』, 36(5): 725~740, 한국수자원학회.
- 환경부, 2006, 「물환경관리기본계획」.
- Brabec, E., Schulte, S., and Richards, P. L., 2002, “Impervious Surface and Water Quality: A Review of Current Literature and Its Implications for Watershed Planning”, *Journal of Planning Literature*, 16(4): 499~514.
- Carter, T. L. and Rasmussen, T. C., 2006, “Hydrologic Behavior of Vegetated Roof”, *Journal of The American Water Resources Association*, 42(5): 1261~1274.
- Center for Watershed Protection(CWP), 2003, *Impacts of Impervious Cover on Aquatic System*, Watershed Protection Research Monograph No. 1., Center for Watershed Protection.
- Doll, B. A., Wise-Frederick, D. E., Buckner, C. M., Wilkerson, S. D., Harman, W. A., Smith, R. E., and Spooner, J., 2000, “Hydraulic Geometry Relationships for Urban Streams Throughout the Piedmont of North Carolina”, *Journal of the*

- American Water Resources Association*, 38(3): 641~651.
- Hasse, J. and Dornisch, V., 2009, "Integrating Impervious Surface Management and Smart Growth Development in New Jersey", *Journal of the Middle States Division Association of American Geographers*, 42: 9~17.
- Konrad, C. P. and Booth, D. B., 2002, *Hydrologic Trends Associated with Urban Development for Selected Streams in the Puget Sound Basin - Western Washington*, USGS Water Resources Investigation Report 02-4040.
- Leopold, L. B., 1994, *A View of the River*. Harvard University Press, Cambridge, MA, USA.
- Lossman, L. A., 2004, *STORM WATER MANAGEMENT USER'S MANUAL Version 5.0*. United States Environmental Protection Agency.
- Miltner, R. J. D., White, D., and Yoder, C., 2004, "The Biotic Integrity of Streams in Urban and Suburbanizing Landscapes", *Landscape and Urban Planning*, 69: 87~100.
- Neller, R. J., 1988, "A Comparison of Channel Erosion in Small Urban and Rural Catchments, Armidale, New South Wales", *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 1~7.
- Pappas, E. A., Smith, D. R., Huang, C., Shuster, W. C., and Bonta, J. V., 2007, "Impervious Surface Impacts to Runoff and Sediment Discharge under Laboratory Rainfall Simulation", *CATENA*, 72(1): 146~152.
- Schueler, T. R., 1987, *Controlling Urban Runoff - A Practical Manual for Planning and Designing Urban Best Management Practices*, Metropolitan Washington Council of Government, Washington, DC.
- Schueler, T. R., 1994, "The Importance of Impervious, Watershed Protection Techniques", *Center for Watershed Protection*, 1(3): 100~111.
- Sheng, J., and Wilson, J. P., 2009, "Watershed Urbanization and Changing Flood Behavior across the Los Angeles Metropolitan Region", *Natural Hazards*, 48(1): 41~57.
- U.S. Environmental Protection Agency(U.S. EPA), 2008, <http://www.epa.gov/>.
- Wang, L., Lyons, J., and Kanehl, P., 2001, "Impacts of Urbanization on Stream Habitat and Fish across Multiple Spatial Scales", *Environmental Management*, 28: 255~266.
- Washburn, B., Yancey, K., and Mendoza, J., 2010, *User's Guide for the California Impervious Surface Coefficients*. Office of Environmental Health Hazard Assessment, California Environmental Protection Agency.
- 원 고 접 수 일 : 2013년 11월 18일  
1차심사완료일 : 2014년 2월 3일  
2차심사완료일 : 2014년 2월 12일  
최종원고채택일 : 2014년 2월 18일