

국내외 도시수문연구
동향과 방향

The Recent Trends of Urban Hydrology

책임연구원 : 이 재 철
(한국토지공사 책임연구원)

연 구 원 : 김 종 섭
(대전산업대학교 교수)

최 종 수
(한국토지공사 주임연구원)

1. 서론

가. 연구의 필요성

19세기의 산업화와 함께 시작된 도시화는 기술의 발전으로 더욱 가속되었고, 앞으로도 경제성장과 함께 지속적으로 도시화는 이루어질 것이다. 이러한 인간활동으로 인한 피할 수 없는 도시화는 인간의 삶의 질을 향상시키고 있는 반면, 자연을 인위적으로 개조함으로써 이루어지는 도시화로 인하여 홍수, 가뭄, 환경오염 등 자연재해는 날로 심각해지고 있다.

이에 따라 정부에서는 기존의 풍수해대책법을 자연재해대책법으로 개정 보완하여 홍수시 유출량을 증가하게 하는 도시 및 산지지역의 대규모 개발사업과 하천의 수위를 증가하게 하는 하천 인접지역의 대규모 개발사업의 재해영향평가를 받도록 규정하고 있다. 또한 지금까지 시행되어 오고 있는 환경영향평가에서는 우수의 유출에 따른 수질오염에 대한 대책수립을 필요로 하고 있다.

그러나, 이러한 국가적인 재해방지노력에도 불구하고 도시수문분야에 대한 연구개발투자의 부족 또는 지연으로 이를 시행할 수 있는 기준설정이 매우 어려운 실정에 있다. 따라서 외국의 도시수문분야에 대한 연구역사 및 연구동향과 국내의 도시수문분야에 대한 연구실정을 파악하여 국내 도시수문분야 연구의 허와 실을 점검하고 향후 국내의 도시수문분야의 연구방향을 정립함으로써 국내에서의 도시수문분야에 대한 연구개발의 활성화를 도모할 필요성이 요구되고 있다.

나. 연구의 목표 및 내용

1) 연구의 목표

국내의 도시수문 연구현황을 파악하고, 향후의 연구방향과 과제를 제안한다.

2)연구의 범위

국외 및 국내의 도시수문 연구역사와 동향에 대한 문헌조사

3)연구의 내용

- 가)외국의 도시수문 연구역사 및 동향
- 나)국내의 도시수문 연구역사 및 동향
- 다)국내의 도시수문연구의 실상과 문제점
- 라)국내의 도시수문 연구방향 및 향후 과제

다. 기대효과

도시수문분야에 대한 외국의 연구동향을 파악하여 국내의 도시수문분야에서 필요한 연구개발투자를 유도함으로써 재해영향평가, 환경영향평가 등의 기준설정을 위한 연구개발의 활성화를 도모하고자 한다.

2. 도시수문학

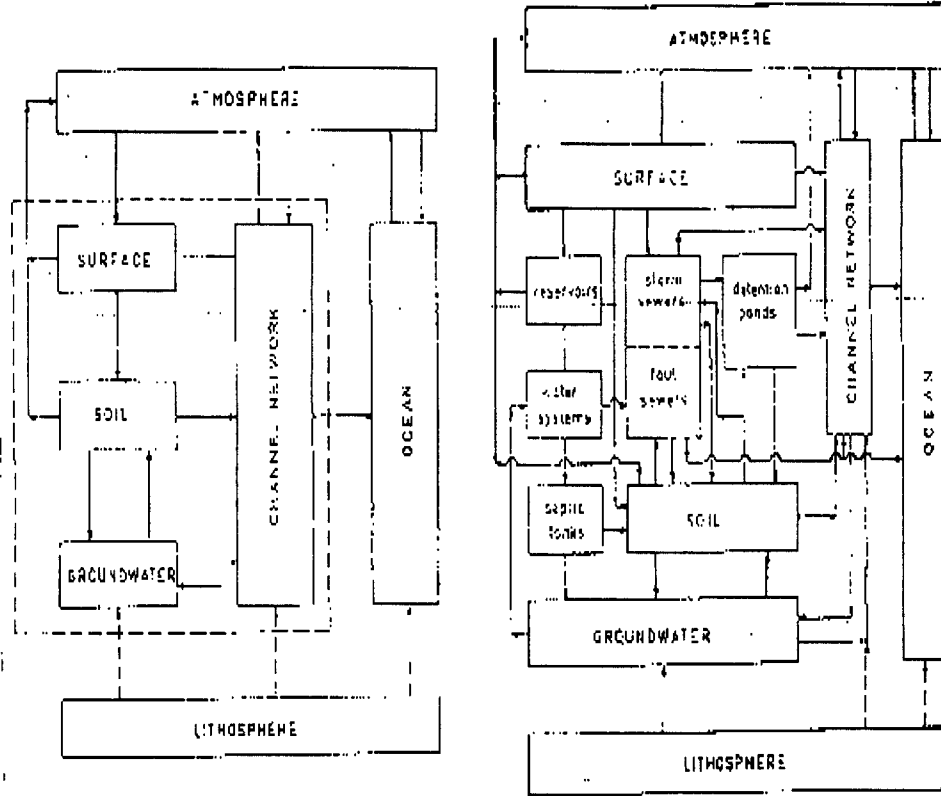
가. 정의

수문학은 지구상의 물을 다루는 물리과학으로 물의 발생, 순환, 분포 및 물의 화학적, 물리적 특성 그리고 생물과 같은 환경과의 반응 등을 포함한다. 이것은 두가지로 크게 대별할 수 있다. 하나는 물의 성질에 대한 것이고, 다른 하나는 물의 시간적 공간적 분포와 흐름에 대한 것이다. 물의 시공간적 분포와 흐름을 수문학적 순환이라고 한다.

수문학적 순환은 자연적인 상태의 순환과 인위적인 상태의 순환으로 나누어 생각할 수 있다. 사람의 영향으로 자연상태의 수문학적인 순환을 변화시키는 요소로는 인위적인 농지 및 초지가 있고, 가장 중요한 것으로 도시와 마을의 탄생이 있다. 이러한 토지이용의 변화로 인한 지표상태의 변화를 다루는 수문학에 많은 연구가 진행되었고, 이러한 연구중 도시화에 따른 수문현상의 변화를 다루는 학문이 별도의 영역을 점하게 되어 이를 도시수문학으로 부르게 되었다.

아마도 도시수문학을 간단하게 정의할 때 “도시수문학은 도시환경내에서 발생하는 수문학적인 과정에 관한 연구”라고 할 수 있을 것이다. 그러나 [그림1]과 같은 도시내에서 일어나고 있는 물의 순환을 자세히 들여다 보면 이러한 정의는 불충분함을 알 수 있을 것이다.

도시화로 자연적인 수로는 변화되거나 관거로 대체되고 홍수는 더욱 자주 심각하게 발생되거나 저류지 등에 의하여 감소하거나 한다. 오수는 처리장을 통하여 정화된 후 수로나 바다로 방류된다. 상수도의 경우 초기에는 인근의 물을 이용하여 공급되지만 점차 인구가 증가하면서 물수요가 증가하여 아주 멀리 떨어진 곳으로부터 상수를 공급받게 되고 때로는 동일 유역내가 아닌 곳으로부터 물을 공급받게 된다. 따라서 도시수문학은 도시화의 영향을 받는 도시내외에서의 수문학적인 과정을 연구하는 학문이라고 정의하는 것이 보다 적절하다고 본다.

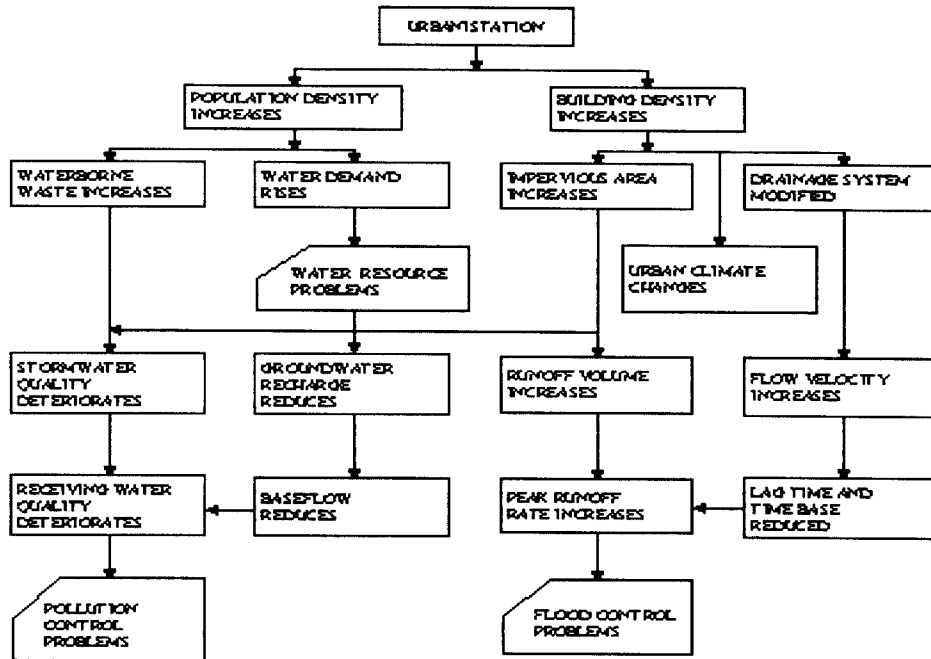


[그림1] 자연 및 도시의 수문학적 순환

자연지역이 도시화되면 물의 흐름체계가 바뀌게 되는데 이에 영향을 주는 요인 중 가장 중요한 것은 인구밀도의 증가와 건물밀도의 증가이다. [그림2]에 모식적으로 나타낸 바와 같이 인구가 증가하면 물수요가 증가하고 또한 생활수준이 높아짐에 따라 물수요의 증가는 가중된다. 이러한 물수요에 대응하기 위한 수자원을 개발하여야 하는 수문학적으로 주요한 문제에 봉착하게 된다. 이것이 도시화가 수문과장에 미치는 첫 번째 문제인 수자원 문제이다.

도시화가 완료되면 우수관망이 설치되어 인구증가에 따른 우수발생량이 증가한다. 그러나 그 결과로 나타나는 수질의 변화는 건물밀도의 증가와 밀접한 관계가 있다. 건물밀도가 증가하면 불투수면이 증가하고 자연수로 체계는 변형되고 지역적인 기후도 변화한다. 불투수면으로 인하여

자연상태일 때보다 강우로 인한 유출이 더 많이 발생한다. 더욱이 우수관망의 설치와 도시화과정에서 발생하는 자연수로의 정비 또는 암거화로 물이 보다 빨리 관거로 전송되는 결과를 가져왔다. 유속의 증가는 유출수 문곡선의 시간에 관계되어 짧은 시간에 보다 많은 유출이 발생되고 이는 침투유량의 증가를 가져온다. 이것이 도시의 수문학적인 주요 문제중 두 번째인 홍수문제이다.

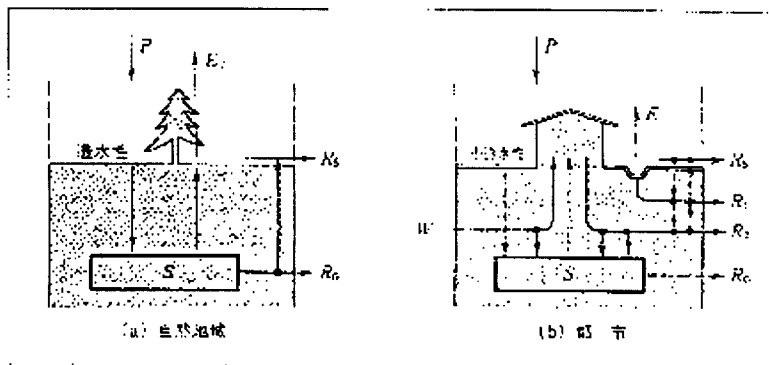


[그림2] 도시화가 수문과정에 미치는 영향

위의 [그림2]에 나타난 바와 같이 수문학적 순환의 수질측면은 인구증가와 불투수면 증가 모두의 영향을 받는다. 개발이 진행됨에 따라서 유출량은 증가하고 반면에 흙을 통한 지하수함양은 감소한다. 그 결과 도시의 지하에 흐르는 지하수로 침투하는 물의 양은 줄어 든다. 강우가 없을 때 기저유출은 이러한 지하저류에 의하여 생성된다. 따라서 도시화가 진행되면서 기저유출은 감소할 것으로 예상된다. 불행하게도 이러한 유출의 감소는 우수발생량의 증가와 강우시 도로, 지붕 및 포장면으로부터 씻겨나오는 오염물질로 인한 수질오염이 동시에 발생된다. 도시내에서 이용되는 우수관망에 흐르는 물과 지하수의 수질오염이 수문학적 문제의 세 번째인 오염문제이다.

나. 도시의 물수지

도시의 물수지를 생각하는 제1단계로서 자연지역과 도시의 물수지 기준을 비교해 보면 [그림3]과 같이 물수지 개념도로 나타낼 수 있다. 이 그림에서 타지역으로 부터의 지하수 유입은 없는 것으로 하고, 하류방향으로는 열린 시스템이다. 또한, 도시는 전면이 불투수성지역이라고 한다.



[그림3] 자연지역과 도시의 물수지

P; 강수 Rs; 표면유출 Er; 증발산 E; 증발 S; 지하수 R_G; 지하수유출
R₁: 우수의 배수구 R₂: 하수도 W; 용수의 도입

자연지역에서 강수(P)의 극히 일부가 표면유출(R_s)이 되고, 나머지 부분은 증발산(E_r) 및 지중으로의 침투수가 된다. 후자는 토양수 또는 지하수(S)의 변화에 관계된다. 지중수의 일부는 모관작용에 의해 토양속으로 상승되어 증발산으로 없어지고, 일부는 용천등의 형태로 침출(浸出)하고, 일부는 지하수의 형태로 땅속으로 흘러들어 간다.

자연지역의 우수중 · 강수직후의 유출 특히 종래에는 표면유출로 보여져 온 성분에 대해서는 최근 새로운 자료가 계속 모아져서 개념이 변화하고 있다. 트레이서를 이용한 동위체수문학(同位体水文學)의 발전이 현저하고, 그 결과에 의하면 자연지역의 강우출수 대부분이 강수의 침투에 의해 압출되어온 지하수 또는 한번 지중으로 잠입한 토중의 간극에서 유출된 물이라고 여겨진다.

[그림3]에 따르면 P→S→R_G→R_s의 경로로 인한 유출이 많다. 따라서,

자연지역에서는 표면유출이 극히 일부에 지나지 않는다. 물의 부존(賦存) 상태와 흐름을 나타내기 위해서는, 수지식(연결식)과 운동방정식 등이 사용되나, 주로 수지식에 기초를 둔다. 습윤지역($P > E_r$)을 상정(가상)하는 도시의 물수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = E_r + \Delta S + (R_s + R_G)$$

ΔS 는 지중의 수분축적량의 변화를 나타내나, 연평균값 또는 연변화의 시점과 종점을 이용하면, $\Delta S = 0$ 이 되고 이 항목은 생략할 수 있다. 다만, 계절변화를 추적할 경우에는 ΔS 가 중요하다. ΔS 에는 적설(잔설)을 포함해서 생각할 경우도 있다.

[그림3]중 도시의 물수지그림에는 이미 언급한 도시수문의 3대 특징인 타지역으로 부터 수도등의 용수도입(W)과 배수시설 및 불투수성지표를 도입하였다. 만약 도시 전역이 불투수성지표라고 하면, 증발은 겨우 강우의 초기와, 강우후 와지(窪地-구덩이)에 남은 물에서만 발생한다. 현실적으로 불투수성지표면도 완전하지 않으므로, 일부는 지중으로의 침투도 생길 것이다. 그러나, 침투하는 물의 흐름은 자연지역의 경우보다는 적으므로, 그림에서는 점선으로 나타내고 있다. 증발(E)과 지중으로의 침투가 적어지므로 도시지역에서는 실제의 표면유출이 발생하고, 그 양은 상당히 많은 편이다. 지중으로의 침투가 감소하고 동시에 우물에 의한 양수가 행해지기 때문에 지하수량은 감소한다. 이와함께 R_G 및 지하수에서 지표로의 침출수량도 감소한다.

수도관에서는 대개 누수가 있고, 이것이 시가지의 지하수량 변화에 관계할 것으로 추정된다. 도시로 부터의 배수는 자연지역과 마찬가지로 R_s 와 R_G 에 의한 것외에 우수의 배수구(R_1)와 하수도(R_2)도 더해진다. R_1 및 R_2 가 별개의 시스템으로 만들어져 있는 경우(분류식하수도)가 있는 가 하면, 양자가 공용으로 된 경우(합류식하수도)도 있다. 이들은 하천과 연락하는 경우도 있으므로 R_s, R_1, R_2 의 사이에는 점선으로 연결되어 있다. 하수도는 지하수와 연결도 있다.

[그림3]을 기초로 도시수역의 물수지를 자연지역과 같은 식으로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$P + W = E + \Delta S + (R_s + R_G + R_1 + R_2)$$

이 식에서는 도시역내에서 물의 이동경로에 대해서는 아무것도 나타내고 있지 않다. 현실적으로 이 과정을 추적한다는 것은 불가능에 가깝지

만 다음에는 이것을 개념적으로 나타내 본다.

도시역의 물흐름, 유출기구의 모델에 대해서는 이미 많은 보고가 나와 있다. 도시역의 물흐름과 비교하기 위하여 자연지역의 물흐름을 [그림4]에 나타내었다. [그림4]는 앞의 그림을 확장하여 그린 도시의 물흐름 모델이다. 이 그림에서는 하천·운하·터널수로등에 의해 상류로부터의 취수가 고려되어 진다. 강수의 일부가 차단되는 것외에 와지(구덩이, 凹地)로 흘러들고 유출에는 관여하지 않는다. 지표면에 도달한 강수의 일부는 불투수성의 지표층을 흘러 하천과 배수구(인공수로)로 들어가고, 지표수로 배수된다. 이와같이 물의 대부분은 하천을 경유하여 배수되고, 이 도시역 내에서 재이용될 기회는 적다.

도시내로 반입된 상수도·공업용수도의 수원은 시역외의 자연하천에 의하든가 혹은 시내의 지하수인 경우가 많다. 여기서, 시내의 지하수도 타지역에서 유입하는 부분이 많다는 것은 주목할 만하다. 상수도의 수원에 대해서는 각국에서 각각 상당히 다른 사고방식을 가지고 있으므로, 세계적으로 본다면 실로 다양하다고 할수 있다. 도시 용수의 일부는 냉각탑에서 수증기형태로 대기중으로 소실되는 것외에 잔디밭과 나무에 살수된 후 증발에 의해 소실되는 부분도 있다. 미국 도시의 일부에서는 이러한 형태의 증발을 무시할 수 없는 것이라고 생각한다.

도시용수의 배수경로는 하수도를 경유하고 처리후 지표수로 방류되는 것이 일반적이나 하수도를 경유하지 않는 경우, 또는 직접 땅속으로 침투하는 경우도 결코 보기드문 것은 아니다. 상수도의 누수, 하수도와 지하수의 교류도 도시 물수지의 한 요소이다. 이상의 물수지항 또는 물흐름을 도시역에서 파악하는 것은 상당히 곤란하며 어느 도시에 대해서도 정확한 수치는 불분명하다.

물이용과 더불어 도시화에 수반한 1인당 소비수량이 증가하고, 각종 물이용의 경합등이 발생한다. 이것을 해소하기 위해서는 원격지(遠隔地)의 수원의 개발과 도수가 행해지기는 하나, 최종적으로는 각종 용수의 재이용이 이루어진다. 도시하천은 그 지형이 바뀌어질 뿐만 아니라, 취수에 의해 항상 유량이 감소하며, 오수의 혼입에 의한 수질 오염(汚濁)이 진행된다. 상시의 유량감소는 콘크리트·아스팔트·지붕등의 불투수성 지표와 배수구(하수도)의 확대와도 관계된다.

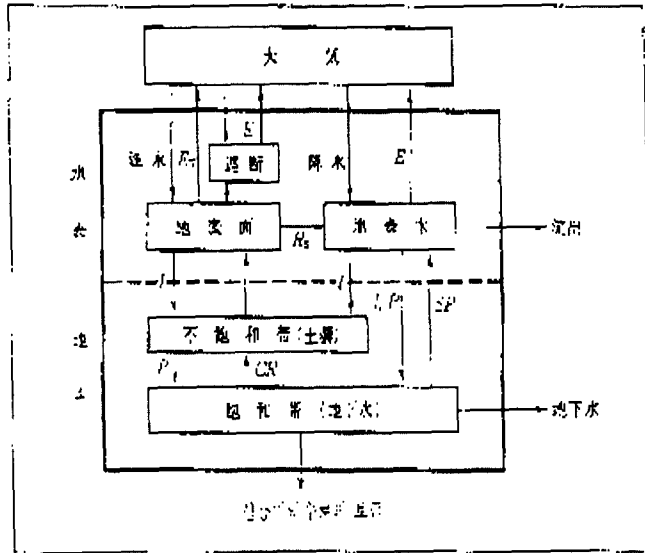
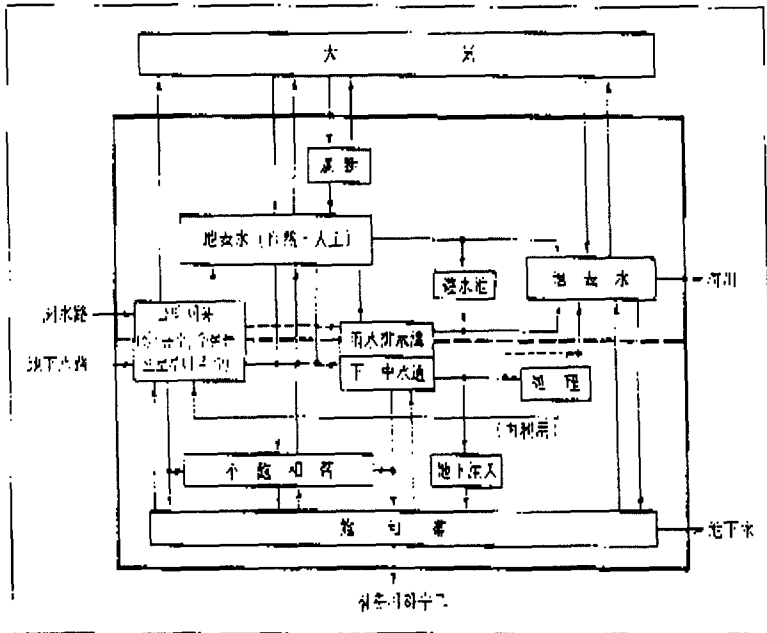


그림 1 농촌지역의 물흐름 모형
 E: 증발, E': 증발산
 SP: 비점(非点) 유출(非点 유출), P: 지표수 침투,
 R: 지표수 유출, R': 지표수 침투



[그림4] 도시의 물흐름 모델

불투수성 지표와 배수구의 확대는 홍수의 빈발과 지하수위의 저하를 가져 온다. 그 결과 우물이 버려지고 어떤 경우는 지반침하가 생긴다. 이들을 방지하기 위해서 지하수의 인공함양이 행해지게 되고 이것이 도시 수문변화의 최종단계라고 생각되어 진다.

최근 지중예의 우수와 배수의 인공주입이 시험되어, 이것이 도시 물부족의 해결수단이 되지 않을까 하고 생각하는 면도 있다. 그러나, 앞에서 말한 바와같이 도시지역내의 수원만으로 현대도시의 물 수요를 만족시키는 곤란하므로 이들 방책은 환경보전을 위한 것으로서 위치를 부여할 필요가 있을 것이다.

이상에서 알아본 바와 같이 도시내의 물흐름을 다루는 도시수문학의 요소로 강수, 표면유출, 증발산, 증발, 지하저류, 지하수유출, 우수배수, 하수도 및 용수 등을 들 수 있다. 이와 아울러 최근에는 생물서식공간과 생태학에 대한 부분도 도시수문학의 한 영역을 차지하고 있다. 지금까지는 우수배수와 관련된 강우-유출관계에 많은 초점이 맞추어 지고 있었으나, 향후에는 이러한 관점에서 용수, 하수 및 지하수에도 많은 관심을 가져야 할 것이다.

3. 외국의 도시수문연구 역사와 동향

가. 도시수문연구 역사

1) 일반사항

지금까지의 도시수문학에 대한 연구의 역사는 주로 강우-유출관계에 대한 관점에만 초점이 맞추어져 있었다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 도시수문학은 이제 더 이상 유출만의 영역은 아니다. 도시내 물흐름에 관계되는 모든 영역을 다루어야 한다. 그런 의미에서 도시수문의 연구역사를 도시의 물흐름과 관계된 모든부분으로 확장하여 알아 보았다.

2) 유출량 문제

도시화가 이루어지면서 가장 문제시 되었던 우수배제는 유출량을 산정하기 위한 방법론에서 부터 시작되었다. 이 부분에 대하여 1889년에 Kuichling은 “인구집중된 지역에서의 강우와 하수 유량과의 관계”라는 논문에서 Mulvany가 1850년 발표한 합리식의 적용방법을 제시하였으며, 1932년 Sherman의 단위 유량도법이 나오기 전까지는 별다른 기술적인 진전없이 합리식이 그대로 쓰여져 왔다.

1930년대의 후기와 1940년대 초기에 걸쳐서 Horner와 Jens는 “유출계수를 사용하지 않고 강우로 부터 표면 유출량을 산정하는 방법”을 발표하여, 새로운 설계법의 개발을 제시하였다. 후자의 논문에서는 단위 유량도 이론의 활용은 지양하고 지표유출율을 결정하는데 보다 깊은 관심을 나타낸 것이다. 1944년에 Hicks는 “도시유출 산정법”이란 논문에서 1942년 Horner와 Jens가 사용한 방법과 대단히 비슷한 방법으로 도시 유출을 해석하였다. 여기서도 물받이 저류, 암거 저류, 지표 손실, 침투 손실 등에 대해 많은 연구가 집중되었다. 하지만 자료의 해석에 있어 단위 유량도 이론이나 이미 제시된 설계법의 개발에는 별다른 진전을 가져다 주지 못하였다.

1940년대와 1950년대의 초기에는 단위유량도 이론을 사용하는 수문학적인 설계법들이 여러기관에서 많이 개발되었으나 도시수문학 분야에 있어서는 Tholin과 Keifer가 “도시수문학”이란 논문을 1960년 미국 토목학

회지에 발표하기 이전인 1950년대 말까지는 별다른 진전이 없었다. Tholin과 Keifer는 논문에서 우수거의 설계에 있어 Chicago Hydrograph Method라는 새로운 설계법을 발표하여 복잡한 우수유출 하수거 설계법에 새로운 현대적 설계방법을 적용하기 시작한 실제적인 효시이다.

1962년에는 Eagleson이 단위유량도 이론을 도시배수 문제에 적용한 논문으로 “도시배수지역에 대한 단위유량도의 특성”을 발표하였다. Eagleson은 이 논문에서 단위 유량도의 침투 유량과 지체시간을 유역특성에다 상관시키는 해석방법을 제시하였다. 1960년대에 들어서면서 부터 많은 기술자들 사이에 도시 유출 문제에 대한 관심이 증가되었고 이 문제를 정립시키거나 적절한 설계지침을 개발하기 위한 많은 연구가 시작되었다. 미국 지질조사소는 작은 도시 유역에 있는 하천의 수문관측을 실시하였으며 도시 유출해석에 필요한 자료들을 얻기 위하여 관측망의 운용을 실시하였다.

1965년 Espey는 텍사스 수자원개발국에 제출한 보고서에서 도시 유출 문제의 보다 완벽한 실태를 파악하기 위하여 Texas주 Austin에 관한 연구 결과와 다른지역에서의 연구결과를 종합 검토하여 상관시키려는 노력을 경주하였다. 영국 도로연구시험소에서 개발한 특수목적 모델인 RRL모델은 도시 우수관망의 설계를 위해 Watkins에 의해 1962년 개발되었다.

Crawford Linsley에 의해 개발된 Standford Watershed Model은 다양한 하천 유역의 수문학적 조건을 최대한 정확하게 표현할 수 있도록 그리고 가용한 자료만 있으면 어떠한 유역이든지 쉽게 적용할 수 있도록 시도되었으며, 이 모델은 홍수량에서의 도시화 효과를 나타내 보이기 위해 Douglas James에 의해 캘리포니아 Sacramento 근교의 Morrison Creek유역에 적용된 바 있다.

도시유역으로 부터의 유출수문학은 1970년대에 가장 큰 관심을 끄는 과제였으며, 유출해석과 우배수 관망설계를 위한 여러 모델들이 만들어졌다. 이 중 SWMM은 도시유역의 유출기구를 모의하기 위해 미국환경 보호국의 지원하에 Metcalf와 Eddy에 의해 1971년에 개발된 사상모의 모델로서 도시지역의 우배수망을 포함하는 유역의 유출현상을 정량적으로 모의할 뿐 아니라 수질의 파악도 가능하도록 고려하였다. 1974년 Stall과 Terstriep에 의해 개발된 ILLUDAS 모델은 RRL 모델에 간단한 강우-유

출판계의 추정절차를 보완하여 도시지역의 배수관망을 계산해내는 사상 모의 모델이다. Yen등에 의해 개발된 ILSD 모델(Illinois Least-Cost Sewer Design Model)은 해당 유역을 몇 개의 소유역으로 나누고, 각 소유역은 다시 유출에 영향을 주지 않는 지역, 집수거(inlet)에 직접 연결된 투수지역과 불투수지역, 보조 불투수지역 및 보조 투수지역으로 나누어 지표면 유출을 계산하고, 우배수관거의 크기와 경사를 최소비용을 고려(Optimization)하여 결정하는 설계모델이다.

특히 1978년에는 그간의 많은 도시유역 유출수문학에 대한 연구자들을 위해 도시우수배제(Urban Storm Drainage)에 관한 제1회 국제학술회의(International Conference)가 영국에서 개최되었으며, 이후 회의는 제2회(1981, 미국), 제3회(1984, 스웨덴), 제4회(1987, 스위스) 등 매 3년 주기로 열리고 있다. 또한 1982년에는 영국에서 도시우수시스템에 관한 제1회 국제세미나가 개최되었고 1986년에는 유고의 벨그라드에서 도시수문모형에 관한 국제심포지움이(UDM'86)이 개최되었고, 이때 도시수문연구를 위한 도시수문자료의 DB화가 이루어져 책으로 발간되었다. 1991년에는 도시수문의 새로운기술에 관한 국제회의(UDT'91)가 역시 유고의 벨그라드에서 열렸으며, 도시지역에서의 유출에 따른 제반 문제들이 각국에서 활발히 연구되고 또한 보고되고 있다.

3)우수의 수질 문제

도시유역에서의 유출수문학에 이어 문제화되고 이에 따라 많은 연구가 진행되고 있는 부분은 수질과 수생태학적인 측면이다. 도시화가 이루어지면서 발생하는 홍수문제를 해결하기 위하여 저류지를 만들거나 아예 개발을 제한하는 방법을 많이 활용하여 왔으나 이러한 방법들이 도시화로 인하여 발생하는 하천의 생태계 파괴와 오염물질의 증가를 해결할 수는 없었다. 그리하여 1970년대 후반부터 도시의 오염을 제거하고 하천 하류부의 수생태계를 보호하기 위한 방법으로 도시지역에 대하여 우수의 최적관리기법이 개발되기 시작하였다.

도시지역에서 비점오염원으로서 우수의 수질오염에 대한 연구는 1960년대 후반부터 그 중요성이 인식되어 연구가 이루어졌다고 할 수 있으나, 1970년대 초반에서 1980년대 중반까지 매우 활발한 연구가 진행되었으며, 현재에도 비점오염원에 관한 연구는 지속적으로 이루어지고 있다. Field

와 Lape 등은 환경공학분야에서 비점오염원에 대한 연구는 아직 체계가 이루어지지 않은 분야로서 광범위한 연구범위를 가지고 있다고 지적하고 이에 관한 연구의 필요성을 강조하였다.

전반적으로 1980년 이전에 연구한 비점오염에 관한 연구는 주로 비점오염원 유출특성, 수질성분별 농도변화, 수학적 모델화, 토지이용별 발생원단위, 연간 발생량 추정, 하천수질에 미치는 영향, 저감방안, 처리기술 등 매우 다양한 분야에서 연구가 수행되었다. 1980년대 이후에는 오염물질의 축적과 세척함수를 중심으로 컴퓨터를 이용한 모델화에 관한 연구와 도시지역에서 발생하는 유출수의 성분 중 석유계 방향족 탄화수소 화합물질 등에 관한 분석, 하천수질에 미치는 영향 등에 대해 많은 연구가 있었다. 1990년대 이후에는 지리정보시스템(GIS, Geographic Information System)과 결합시킨 비점오염원의 확인 및 오염부하량의 산정 등에 관한 연구 등이 진행되었다. 또한 강우시 도시유출수에 응집제를 투여하여 고속으로 침전시켜 오염물질의 배출을 저감시키는 기술이나 모델링 등에 대해서도 활발한 연구가 진행되고 있다.

비점오염원에 관한 외국의 연구사례를 연대별로 살펴보면 다음과 같다. 1972년도에 수질관리에 대한 헌장이 제정되면서 수질오염에 대한 연구가 본격화되었고, Field 등은 1972년에 합류식 하수관 월류수를 처리하지 않고 하천으로 방류시 하천수질에 심각한 영향을 주며, 특히 강우초기의 세척효과는 하천생태계에 큰 영향을 미치고 있다고 보고하였으며, Sartor와 Boyd는 같은 해 도로표면의 오염물질로 인한 수질오염에 대하여 논하였다. 1973년 Chen 등은 합류식 하수관 시스템의 가장 큰 문제점으로 강우시 차집용량 이상의 월류수가 하천에 과부하를 초래할 수 있음을 지적하고, 차집용량을 결정하는 방법론을 제시하였다. 1974년에 Sartor 등은 인공적으로 거리에 살수를 하여 노면의 상태, 토지이용별 오염물질의 유출특성에 대해 연구하였는데, 오염물질의 유출량은 살수강도(또는 강우강도)에 비례하며, 노면에 축적된 오염부하량에 비례한다는 관계를 제시하였다. 또한 그는 오염물질 입경을 분석하여 토지이용별 축적함수를 제시하였다. 현재까지 개발된 많은 유출모델들이 Sartor 등의 연구를 기초로 하여 제시되었다. 같은 해 Colston은 도시지역의 여러 토지이용별 소유역에 대해 2년간 강우시 유출수질 및 유출량을 분석하여 수질농도 C 를 예측하는 함수로, 유출량 Q , 강우지속시간 T , 그리고 회귀계수 a, b, c 를 이용하여 $C = a Q^b \cdot T^c$ 란 관계식을 제안하였으며, Loehr는 도시지역과 비

도시지역, 산림지역 등 토지이용에 따라 강우시 단위면적당 연간 오염물질 발생부하량을 제시하였고, 발생 원단위를 수질성분별, 계절별로 제시하였다. 1975년에는 Nightingale이 도시우수저류지내의 토양이 중금속에 오염된 사실을 발표하였으며, Whipple 등은 비점오염원에 대한 분석방법으로 하천에 있어 오염물질의 물질수지를 이용하는 방법을 제시하고 실제 유역에 적용하였고 1977년에는 강우시 도시 하수관에서 초기세척에 의해 배출되는 오염부하량은 건기시의 수백배 이상으로 하천오염의 주요한 원인임을 지적하였다. 도시 소유역의 경우는 대부분이 강우 발생 후 30분 이내 초기세척이 발생하지만, 대유역은 세척효과가 크지 않다고 보고하였다. 또한 유역의 단위면적당 유출되는 오염부하량은 계절별로 차이를 나타내는데, BOD₅의 경우 여름>겨울>봄>가을 순서로 그 부하량이 크다고 하였다. 또한 Mattraw와 Sherwood는 주거지역내 우수유출수의 수질오염에 대하여 발표하였다. Wanielista 등은 1977년에서 1978년에 걸쳐 소유역에서는 강우초기에 오염물질의 농도가 높게 나타나나, 대유역의 경우는 소유역간의 유달시간의 차이로 인하여 불규칙하게 나타난다고 하였다. 따라서 유출특성 분석시 오염부하량과 시간과의 관계인 loadograph는 대규모 유역에 적합하고, 소규모 유역은 농도와 시간과의 관계인 pollutograph가 일반적으로 적합하다고 하였다.

1978년에 Heaney 등은 도시지역에 우수지를 이용하여 강우유출수를 저류시켜 처리할 경우 강우량당 유역면적당의 처리비용은 인구밀도에 지수적으로 비례한다고 하였다. 또한 인구밀도와 불투수성 면적간에 회귀함수를 도출하였다. Smith 등은 같은 해에 강우시에 7개 도시에서 분류식 하수관과 합류식 하수관 월류수의 BOD₅를 분석한 결과 합류식 하수관의 오염부하량이 분류식보다 3-4배 많다고 보고하였다. 또한 합류식 하수관 월류수의 하천방류로 인한 용존산소 농도의 변화를 예측하는 SWOPS (Stormwater Overflow Pollution Stream) 모델을 개발하였다. Wanielista 등은 비도시지역에서 발생하는 주요 비점오염물질로는 토사 및 비료, 농약 등으로 이들 오염물질의 발생에 영향을 주는 요인으로 토양유형, 기후, 토지이용유형, 피복상태, 토지관리상태 등을 들고 있고, 이런 인자들을 고려하여 원단위법에 의해 발생부하량을 산정하였다. 반면, 도시지역에서 발생하는 비점오염물질들은 유기물질, 세균, 쓰레기, 농약, 중금속, 기름 등으로 이러한 물질의 농도는 극단적인 수질변동을 나타내고 있다고 하였다. 특히, 중금속 성분중에는 Pb, Fe이 주요 오염물질이라고 하였다. 또한 아스팔트 노면이 콘크리트 노면보다 약 80%이상 많은 오염물질

을 배출하며, 상태가 불량한 노면이 양호한 노면보다 배출량이 많다고 보고하였다. 1979년에 Hunter 등은 GC를 이용하여 도시지역 강우유출수의 탄화수소 화합물질을 분석한 결과 2.18-5.30mg/L의 범위였다. 조사된 탄화수소 화합물질 중에서 입자성 물질이 차지하는 비율이 86.4%이고, 이중 70%가 사슬구조인 지방족(aliphatic)화합물질인데, 대부분이 사고로 인한 누출, 투기, 자동차 엔진에서의 누유가 주요 원인이라고 보고하였다.

같은 해 Cermola 등은 합류식 하수관 시스템에 대한 평가와 월류량을 저감시킬 수 있는 시설의 개발을 위해 57km²유역에 대해 SWMM IV모형을 적용하여 연구하였다. SWMM IV모형의 적용을 위해 유출량 보정에 사용한 인자는 지표면적, 유출폭(runoff width), 지표면 경사, 조도계수, 저류깊이, 투수율, 그리고 불투수층 면적분율을 이용하였다. 보정인자에 대한 민감도를 분석한 결과 불투수층 면적분율은 유출량에 가장 큰 영향을 주는 인자이고, 유출폭은 침투유출량의 발생시기에 영향을 주는 인자라고 보고하였다. 또한 수질을 예측한 결과 BOD₅, SS의 경우 초기에 고농도를 나타내었으나, 침투 SS농도가 발생하기 이전에 BOD₅농도가 증가하는 것은 용해성 BOD성분에 의한 것으로 해석하였다.

1980년에 들어서서 Polls 등은 점오염원에 대해서는 특성, 규모 및 영향 등 많은 연구가 있었지만 비점오염원 관리없이 수질목표 달성은 불가능하다고 지적하였으며, 특히 도시지역에서 비점오염원에 대한 연구의 필요성을 강조하였다. 또한 비점오염원 조사를 위한 유역 선정시의 기준 등을 제시하였다. Freedman 등은 도시내에 존재하는 호수의 수질은 폐수 처리율을 증가시켜도 여전히 용존산소 농도가 낮고 세균농도가 높게 나타나는데, 이같은 현상은 합류식 하수관 월류수와 우수유출에 의하여 오염부하량이 가중된 데 그 원인이 있는 것으로 보고하였다. Field 등은 1981년에 인구증가와 산업의 발달로 용수수요가 증가함에 따라 용수공급량이 부족해지므로 도시지역의 강우유출수를 공업용수, 비음용 가정용수, 지하수 재충진용으로 재이용하기 위한 타당성 조사를 위해 여러 종류의 도시폐수의 성상을 조사하여 제시하였다.

Jewell 등은 1981과 1982년에 많은 연구자들이 강우유출량과 수질을 예측하기 위해 모델을 이용하지만 검증되지 않은 모델의 사용과 측정자료의 오차로 인해 모델의 상당한 부분이 신뢰성이 결여되어 있다고 강조하였다. Whipple 등은 도시 유출수의 성분중에서 가장 유해한 물질은 석유계 탄화수소 화합물질, Pb, Cu, Cd, PCBs임을 강조하고, 침강시험을

통해 이들 물질들의 제거 가능성을 연구하였다.

Hoffman은 1982년에 탄화수소 화합물질 부하와 총강우량, 토지이용, 탄화수소 화합물질 농도, 그리고 SS농도간의 관계에 대해 연구하였다. 유출량을 고려하여 가중평균한 탄화수소 화합물질농도는 0.69-2.15mg/L로 Hunter등이 제시한 농도(Hunter, 1979)보다는 낮지만, 이는 유역별, 환경요인 등에 따라 농도범위가 달라질 수 있다고 하였다. 1985년에 Klemeston은 SS에 대해 Colston(1974)이 제시한 유출량과 강우지속시간과의 함수식을 적용한 결과 강우강도, 강우지속시간과 밀접한 관계가 있음을 밝혔다.

Fam 등(1987)은 미국 San Francisco의 15개 유역에 대해 2년 동안 탄화수소 화합물을 GC로 분석한 결과 상업지역과 산업지역이 주거지역보다 탄화수소 화합물질을 상당히 많이 배출하고 있음을 밝혔다. 또한 TEO(Total Extractable Organics)와 토지이용과의 관계, 강우지속시간에 따른 오염물질의 농도변화 및 탄화수소 화합물질 발생량에 대한 오염기여도를 분석하였다.

Nix는 1994년에 도시지역에서 강우에 의해 발생가능한 오염물질의 성분별 발생원을 조사정리하였다.

한편, 1978년부터 1983년까지 수행된 미국환경청의 NURP(Nationwide Urban Runoff Program)에 따르면 28개의 대상지역을 조사한 결과, 도시지역의 비점오염원으로부터 유출되는 현탁성고형물질과 COD의 연간 부하량은 2차 처리하수의 오염부하량과 같은 수준이거나 그 이상이라고 보고했다. 또한 1990년의 National Water Quality Inventory에 따르면 수질악화의 원인중 약 30%는 우수유출에 기인한다고 보고했으며, North Carolina에서의 1992-1993년 자료에서는 인근 호수 수질오염 원인의 64%가 도시의 우수유출에 기인하는 것으로 나타났다.

4)우수의 환경적인 문제

앞에서 언급한 바와 같이 우수유출수의 수질에 대한 문제가 많이 제기되면서 홍수뿐만이 아니라 수질을 저감시키거나 사전에 막아보자는 의견이 대두되어 이에 대한 연구가 1970년대 말부터 시작되어 우수를 유역의 전반적인 관점에서 보호관리하기 위한 BMPs(Best Management

Practices)에 대한 연구결과가 많이 발표되었다. 1972년에는 도시우수를 조절하기 위한 투수포장에 대한 조사가 있었고 1975년에는 미국의 SCS에서 개발지역에서 토양의 침식과 유사관리에 대한 시방서를 발간하였다. 1978년에도 투수포장에 대한 연구가 시행되고 수량과 수질을 고려한 우수저류지에 대한 설계해석기법을 발표하고 1980년에는 EPA의 주도하에 도시의 우수오염조절에 관하여 연구가 진행되었다.

1981년에는 Mattraw와 Miller가 도시내 3개의 토지이용지역으로부터 발생하는 우수의 수질오염에 대하여 발표하였으며 같은 해 Wanielista등은 우수관리를 위한 침투용 저류지에 대한 연구보고를 하였다. 1982년 Anderson은 도시내의 저습지(swale) 설계에 대한 평가를 수행하였으며, ASCE에서는 도시내 우수저류시설에 대한 국제회의를 개최하였다. 같은 해에 Post등은 녹지 저습지와 저류지로 이루어지는 BMPs에 대한 평가를 수행하였다. 1984년에는 Harper 등에 의해 고속도로 유출수내 함유된 중금속을 도로변에 조성한 저습지로 정화하는 효과에 대한 연구가 발표되었고, Stenstorm등은 도시우수에 함유되어 있는 오일과 그리스에 대한 조사연구를 수행하였다. 또한 Tiner는 미국의 습지에 대한 현재와 개발동향에 대하여 발표하였다.

Avellaneda는 1985년에 저습지를 수문학적인 관점에서 설계하는 기법을 발표하였고, 같은 해에 Cox는 BMP와 도시우수관리에 대한 개관을 발표하였고, Godfrey는 습지를 이용한 오수처리에 있어 생태적인 고려사항을 발표하고, 같은 해 우수관리를 위한 투수포장에 대한 많은 연구결과가 발표되었다. 1986년에는 Harrington은 수질개선을 위한 습지연못의 타당성분석에 대하여 그리고 Hartigan은 유역의 BMP 기본계획 수립기법에 대하여 논하였다. Shaver는 우수관리를 위한 침투시설에 대한 연구를 수행하였다. 1987년 Schueler는 도시우수관리를 위한 BMPs의 계획과 설계 매뉴얼을 작성하였다. Branscome과 Toamsello는 1988년에 침투시설에 대한 현장시험을 실시하여 그 결과를 발표하였다. 같은 해 FCPA에서는 투수포장 지침을 작성 발간하였다.

1991년 Ontario Ministry에서는 우수수질을 위한 BMPs를 발간하였다. 1993년 Schueler등은 우수저류지와 습지시스템의 적용효과에 대하여 논하였고, 1995년 Christensen등은 우수관리와 설계를 위한 환경 BMPs매뉴얼을 작성 발간하였다.

지금까지의 외국의 도시수문연구 역사를 정리하면 [표 1]과 같다.

[표 1] 외국의 도시수문연구 역사

년도	저자 또는 기관	개발 내용 및 적용 현황
1850	Mulvany	합리식
1889	Kuichling	미국내 계측 유역에 대한 합리식의 적용
1906	Lloyd-Davies	영국에서의 합리식
1930	Metcalf and Eddy	배수구역 분할법 제안
1932	Sherman	단위유량도법
"	Gregory and Arnold	일반적인 합리식
1942	Horner and Jens	유출계수 사용않고 표면유출량 산정하는 방법
1944	Hicks	Los Angeles 수문곡선
1958	Bock and Viessman	유입수문곡선법
1960	Tholin and Keifer	Chicago hydrograph
1962	Watkins	RRL모델 개발
1964	Jens and McPherson	문헌조사, 평가
"	Public Law 88-379	Office of Water Resource Research, Dep. of the Interior 개설
1965	Urban Hydrology Reseach Council	공학적인 내용에 기초한 세미나
"	Eagleson and March	단위유량도를 도시수문학에 적용
1966	Viessman	단위유량도를 도시수문학에 적용
1967	ASCE	도시수자원 연구 프로그램 착수
1968	Leopold	도시내 토지이용이 수문에 미치는 영향의 지침서
1969	APWA	도시유출의 수질오염에 대하여 언급
1971	EPA	SWMM 개발 및 개선
1972	Public Law 92-500	수질오염관리에 대한 토론
"	Rao et al.	순간단위유량도를 도시수문학에 적용
"	Sartor and Boyd	도로표면 오염물질에 의한 수질오염에 대하여
"	Thelen	도시우수를 조절하기 위한 투수포장의 조사
1974	U.S. Army, Corps of Engineers,	STORM 개발 및 개선
"	Illinois State Water Survey	ILLUDAS 개발 및 개선
"	Real Estate Research Corporation	도시주변의 주택단지개발방식에 따른 환경 및 경제적 비용 연구
"	SCS	플로리다 도시내 환경계획 지침
"	Urban Land Institute	개발의 환경영향
"	Lavine	내륙 습지와 수로의 기능에 대한 평가
"	Colston	도시유출의 특성과 처리방법

년도	저자 또는 기관	개발 내용 및 적용 현황
1975	U.S. Department of Agriculture	Technical Release No. 55(TR-55)
"	McPherson and Mangan	ASCE 프로그램의 28개 기술부문 요약 발표
"	SCS	개발지역에서 토양의 침식과 유사관리에 관한 시방서
"	Nightingale	도시우수저류지내 토양의 중급속
1977	McPherson and Mangan	ASCE 프로그램의 48개 기술과제에 대한 요약 발표
"	McPherson and Zuidema	도시수문모형에 대한 국제적 연구의 요약
"	UNESCO	12개국가의 도시수문연구
"	Mattraw and Sherwood	주거지역내 우수유출수의 수질
"	Abbot	STORM의 검정 및 적용지침 작성
1978	McPherson	문헌조사 연구(309참고문헌)
"	ASCE	도시화지역의 물문제에 관한 학술세미나
"	Marsh	토지이용과 단지계획을 위한 환경분석기법
"	ULI	주거지내 침식과 유사관리에 관 설계지침
"	Wanielista	우수관리 : 수량과 수질
"	Thelen	투수포장의 설계와 개발
"	Wanielista and Yousef	수질과 수량조건을 이용한 우수 저류지의 설계와 해석
"	ASCE 등	제1회 도시우수배제 심포지움(영국)
1979	Lystrom and Alley	도시유역 D/B 개발 및 우수관리기법평가
"	Public Law 95-217	수질에 관한 비점오염원 연구
"	McPherson	문헌조사연구(220참고문헌)
"	Steele and Stefan	문헌연구(수질)
"	Cermola 등	합류식 하수시스템에 SWMM을 적용함
1980	Alley, et al.	매개변수-결정론적 모형
"	Delleur and Dendrou	문헌조사 연구(183참고문헌)
"	Field	EPA의 도시 우수오염조절에 대한 연구
"	Rubenstein	단지와 환경계획의 지침
"	Hannon	우수의 지하방류
"	Bedient 등	우수의 오염부하와 유출관계에 대하여
"	Collins 등	미시간의 우수 유출수의 수질 조사연구
1981	Delleur	문헌 조사 연구(77참고문헌)
"	Mattraw and Miller	3개 토지이용지역 우수수질
"	Wanielista 등	우수관리를 위한 침투용 저류지
"	Yen Ed.	제2회 도시우수배제 심포지움(미국)
"	Field 등	도시우수의 공업용수로의 재사용
"		도시우수가 수용하천에 미치는 영향
"	Whipple	도시우수에 포함된 오염물질의 침강

년도	저자 또는 기관	개발 내용 및 적용 현황
1974 ~1981	University of Kentucky	연례회의 개최
1982	Featherstone(Southampton)	도시우수시스템에 관한 제1회 국제세미나(영국)
"	AGU	AGU의 도시수문학 소위원회 결성 및 연구보고서작성
"	Anderson	저습지 (swale) 설계의 평가
"	ASCE	우수저류시설에 대한 국제회의
"	Bender and Rice	도시내 도로청소가 우수유출수의 수질에 미치는 영향
"	Field and Masters, Singer	투수포장에 대한 연구 개관
"	Hoffman	상업지역내 우수유출수의 폐유
"	Post 등	2개의 BMP(녹지 저습지와 저류지)의 평가
1983	Driscoll	도시유출관리를 위한 저류지의 역할
"	Ferrara and Witkowski	우수저류지의 수질에 대한 고려
"	Sonnen	도시우수 유출수의 모니터링 지침서
1984	Cullum	단독주택지내 우수유출수의 수질 분석
"	Harper and Yousef, Wanielista	고속도로 유출수내 중금속 제거를 위한 도로변 저습지의 효과에 관한 분석
"	Hvitved-Jacobsen	고속도로 유출이 방류되는 저류지의 인과 질소의 예측
"	Stenstorm 등	도시우수의 오일과 그리스
"	Goteborg, Sweden	제3회 도시우수배제 심포지움(스웨덴)
"	Tiner	미국의 습지-현재와 동향
"	Brown	우수유출의 수량과 수질의 관계를 규명함
1985	Harper	고속도로 유출로 인한 중금속 예측
"	Avellaneda	저습지 (swale)의 수문학적 설계
"	Cox	BMP와 도시우수관리의 개관
"	Godfrey	습지를 이용한 오수처리에 있어 생태적인 고려사항
"	Hartigan and Quasebarth	도시의 비점오염원 관리
"	Hays	우수관리를 위한 투수콘
"	Medico	투수포장을 이용한 우수관리 시스템 설계와 비교
"	Wanielista and Yousef	우수관리공법에 대한 개관
"	"	저습지(swale) 수리
"	Martin and Smoot	저류지-습지시스템을 통과하는 도시우수의 오염 부하 변화
"	Shaver	우수관리를 위한 침투시설
"	Wiegand	도시유출 조절을 위한 비용
"	Urbonas and Roesner	도시유출수의 수질에 대한 영향과 수질정화기술

년도	저자 또는 기관	개발 내용 및 적용 현황
1986	University of Belgrade	도시수문모형에 관한 국제심포지움(유고, UDM '86)
"	Hampson	우수저류지가 수질에 미치는 영향
"	Harrington	수질개선을 위한 습지연못의 타당성 분석
"	Hartigan	유역의 BMP기본계획
1987	IAHR	제4회 도시우수배제 심포지움(스위스)
"	Nightingale	도시우수의 저류 및 지하수함양지내 토양의 중금속 축적
"	Schueler	도시우수 관리를 위한 BMPs의 계획과 설계 매뉴얼
"	Walker	도시우수 저류지를 이용한 인의 제거
"		
1988	Branscome and Tomasello	침투시설의 현장시험
"	FCPA	투수포장 지침
"	Whalen and Cullum	도시내 토지이용과 우수유출수 수질의 관계 및 우수관리 시스템의 처리효과에 대한 평가
1991	UNESCO	도시수문의 새로운 기술에 관한 국제회의(유고, UDT '91)
"	Ontario Ministry	우수수질 BMPs
1992	ASCE/WEF	도시우수 관리 시스템의 설계와 시공지침 작성(1969, 1982년 발간물의 보완분)
"	Schueler 등	연안역에서 비점오염원에 의한 오염을 저감시키는 기술
"	Schueler	다양하고 효과적인 우수습지 창출을 위한 지침
"	U.S. EPA	우수시료의 채취 지침
"	Schueler	도시하천 보호를 위한 단지계획
1996	Line 등	공업단지 우수유출수의 수질에 대한 조사연구
1993	Schueler	우수저류지와 습지시스템의 작용
"	Reese	유역내 우수관리 계획
"	U.S. EPA	도시유출수의 오염방지법과 관리계획
1995	Christensen 등	우수관리와 설계를 위한 환경 BMPs 매뉴얼
"	Herson-Jones 등	도시하천 보호를 위한 연안역 완충지대 전략연구
"	Corish	도시유역 관리를 위한 단지도공 전략

나. 도시수문연구 동향

외국의 도시수문연구는 도시내 물의 흐름을 총체적으로 유지관리하는 종합시스템에 관한 연구를 도시수문연구의 방향으로 잡고 있다. 도시수문학을 구성하는 강우, 지표수, 지하수, 수질, 상수도, 하수도(우수, 오수), 생물서식공간 및 생태학을 모두 고려하는 종합적인 연구가 주류를 이루고 있다. 이러한 경향이 미국에서는 BMPs(Best Management Practices)

에 대한 연구로 나타나고 있다. 구성요소별로 알아 보면 다음과 같다.

지표수의 경우 배제위주의 방법에서 저류위주의 방법으로 전환하고 있다. 이는 홍수에 의한 피해를 저감시키기 위한 목적과 도시내에 저류시켜서 환경친화적인 단지를 조성하고자 하는 점과 저류 및 침투를 통한 지하수를 함양하고자 하는 두가지의 목적을 갖고 있다. 우수에 의한 지표수를 관리하는 방법으로 오염물질을 저감시키는 비구조적인 방법과 오염물질 및 수량을 조절하기 위한 구조적인 방법 그리고 침식과 유사문제를 조절하기 위한 방법들로 구분할 수 있다.

먼저 비구조적인 방법으로는 화학비료의 사용조절, 살충제 사용의 조절, 고품폐기물의 수집과 폐기, 개발현장에서의 오염원 조절, 도로표면의 청소 등을 들 수 있다. 구조적인 방법에는 블록포장이나 투수성포장, 저류지, 침투트렌치, 잔디를 이용한 저습지, 주차장 저류지, 투수성 아스팔트나 콘크리트 포장, 침투용 저류지, 지붕 유출수의 배제, 간이처리장, 침투관 등이 있다. 세 번째로 침식과 유사문제에 있어서는 다시 구조적인 방법과 식생을 이용하는 방법으로 나눈다. 구조적인 방법에는 도로의 안정화, 유사방지막, 보나 차단막, 유사침전지, 유로나 배출구의 보호 등을 들 수 있고, 식생방법에는 식생활착을 위한 단지도공, 잔디공법, 뿌리덮개 이용법, 기타 식생법 등이 있다. 이러한 여러 가지의 방법들에 대하여 현장 시험 등을 통하여 실무에 적용할 수 있는 기준들을 제시하는 연구를 수행하여 현재 많은 도시에서 적용하고 있다.

우수의 수질은 수량과 더불어 매우 중요한 요소로 인식되어 왔고 지금은 수량보다 더욱 중요한 요소가 되었다. 우수에 의한 오염은 특이하게 비점오염이라는 것이다. 우수의 경우는 도시에서는 점오염원으로서 대부분 처리되어 방류되므로 관리하고 통제하기에 쉬운 편이나 우수에 의한 오염은 흩어져 있는 오염원을 쓸고 내려오는 관계로 오염원의 통제 및 관리가 매우 어렵다는 것이다. 대상 면적이 넓고 수량도 많으므로 이를 처리하는데에는 많은 비용도 뒤따른다. 이에 대한 연구는 우선 도시우수의 수질에 대하여 수행되었고 이로부터 토지이용별 수질 오염원을 분류하고 있다. 오염원에 대한 분류가 연구된 후 이를 처리하는 방법에 대한 연구가 진행되었다. 처리방법에 대한 연구로는 습지에 대한 연구가 많다. 일명 생태연못이라고도 하는 습지에는 식생을 이용하는 경우에 대한 연구도 진행되었고 우수저류지를 이용한 수질정화 방법도 연구되었다. 다음

으로 연구되는 것은 도시를 계획할 때부터 수질에 대한 고려를 함으로써 도시의 전반적인 우수관리계획에 의거 수행되도록 하는 방법이다. 이것이 곧 앞서 언급한 BMPs의 일환이다.

최근 들어서는 수량과 수질을 동시에 관리하는 기법에 대한 연구가 주를 이루고 있다. 이는 도시의 환경친화적인 개발과 연계하여 생태적인 접근이 요구되는 경향과 맥을 같이하고 있다. 자연적이었던 수환경을 인위적으로 바꾸지 않고 자연적인 상태를 유지하고자 하는 노력을 기울이고 있다. 자연형 하천의 복원 및 창출에 대한 연구가 이것을 나타내 주고 있다. 이러한 개념을 총체적으로 연구하는 분야가 BMPs에 대한 연구이다. 이 BMPs에 대한 연구는 부문별로 추진된 후 최종적으로 모아져서 하나의 매뉴얼로 작성발간 되었다.

4. 국내의 도시수문연구 동향과 문제점

1960년대부터 본격화된 외국의 도시수문 연구역사에 비하여 국내의 도시수문 연구는 늦게 시작되었으나 도시화와 연계하여 생각하면 아주 늦은 것은 아니다. 그러나 현 시점에서는 도시수문에 대한 연구가 매우 부진한 편이다. 국내의 도시수문 연구역사에 대하여는 수량에 대한 부분과 수질에 대한 부분으로 나누어 생각해 보았다.

우선 수량측면에서 생각해 보면, 국내에서는 하수관망 설계를 위한 합리식 적용이 1970년대의 도시개발과 함께 시작되었으나, 도시수문에 관한 연구는 1980년도의 이, 고, 전 등이 도시수문모형의 소개와 도시화가 유출에 미치는 영향에 대한 연구가 필요함을 주장하고, 이에 따른 도시내 수문관측의 필요성을 발표하면서 실제적으로 시작되었다고 할 수 있다. 이때에도 전 등은 국내의 도시수문 실측자료의 부재로 외국의 실측자료를 이용하여 개발모형의 유용성을 입증하였으나, 도시수문연구의 한계가 있음을 지적하였다. 1981년 서 등은 RRL모형을 변형하여 적용하였으나 배수망의 정확한 자료와 실측유량자료의 부재로 우수소통능력평가를 실시하지 못하였고, 도시화율에 따라 침투유량이 변화하는 사실만 모의하였다.

1980년대 초기 시작된 도시수문연구는 80년대 중반기부터 후반기까지 소강상태를 보이다 1990년에 대홍수를 겪으면서 도시유출에 대한 관심이 높아지게 되었고 1990년에 최, 고, 이, 안, 표 등이 도시개발 등 도시화에 의한 홍수량 증가로 홍수피해가 증가하며, 이에 대한 대책으로 도시개발시 유출억제 시스템의 개발·적용과 수문영향평가제의 도입을 제안하였다. 아울러 외국의 사례를 들어 국내에서도 도시수문 관측시스템을 구성하여 운영해야 한다는 제안과 토지이용변화를 치수계획에 미반영하고 있다고 지적하기도 하였다. 도시내의 실측자료가 없던 때에 이 등은 대학 캠퍼스내에 시험유역을 선정하여 1년간에 걸친 자료를 수집·활용하였다. 또한 표 등은 1990년 도시화에 의한 수문특성 변화 연구를 통하여 국내의 도시수문에 관한 정량적인 연구의 미진함과 우수저류시설의 개발연구가 필요함을 지적하였다. 1991년 전은 ILLUDAS 모형과 ILSD모형을 국내의 유역에 적용이 가능한지에 대한 연구와 도시화영향에 대한 연구를 많이 수행하였으나 국내 도시수문 실측자료의 빈곤으로 질 높은 연구에 한계가 있음을 지적하고 도시 수문량의 지속적인 측정을 요구하였다.

1992년 윤 등은 도시구역의 홍수량 산정을 위한 도시홍수유출모형의 연구에서 서울의 2개 우수지 지점을 대상구역으로 선정하여 모형의 유용성을 검토하였다. 이 연구에서 선정한 대상구역의 실측유출자료는 우수지의 수위를 이용한 간접적인 계산에 의한 방법을 사용하였다.

1993년 이 등은 SWMM 모형을 실측자료가 있는 외국의 구역에 적용한 결과로 모형의 유용성을 검증하였다. 신 등은 서울 용두우수지의 실측유량 및 수질자료를 이용하여 SWMM 모형의 국내 적용성을 검토하였다.

강우시 도시지역에서 유출되는 오염물질의 특성 및 해석에 관한 연구로서 이노성(1991)은 서울시 송파구 일부 구역을 대상으로 강우시 유출수에 대한 실측을 통하여 도시주거지역의 단위면적당 발생부하량을 제안하였다. 신현석 등(1993)은 SWMM IV(Storm Water Management Model Version IV) 모델을 용두 우수지 구역에 적용하여, 유출량 및 비점오염부하량에 대한 침투값, 침투도달시간 등에 대한 상대오차를 분석하였고, SWMM IV모형은 강우시 비점오염물질 배출량을 예측하는데 적합하다고 보고하였다. 또한 BRRL법, ILLUDAS모형을 동시에 적용하여 예측된 유출량과 실측값을 비교한 결과 SWMM IV모형이 가장 실측값에 일치하는 결과를 얻었다. 최지용(1994)은 실측자료가 부족한 국내의 중소 수계에서 간단한 기상자료와 구역특성자료를 이용하여, 일별 비점오염원 유출과 이들이 수질에 미치는 장기적인 영향에 대한 모의가 가능한 비점오염원 모형인 KONDI(Korea Nonpoint Discharge and Impact) 모델을 개발하여 산림, 농업지역인 효동호 유역을 대상으로 모형을 적용하였다.

국립환경연구원(1989)에서는 경기도 이천읍 지역의 기상과 구역의 특성을 조사분석하여 SWMM IV 모형과 STORM(Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model)모형을 이용하여 유출과 수질을 산정하였으며, 모형의 민감도 분석을 실시하였다. 이관영(1995)은 강우강도, 유출량, 부하량과 농도와 4가지 함수를 이용하여 구성된 여러 모형을 실측값과 비교한 결과, 유출량과 오염부하량의 지수함수로 구성된 모델이 실측농도에 가장 잘 일치된다고 보고하였다. 이준호 등(1996)은 강우지속시간에 따른 오염물질 농도변화를 예측하는 모델식을 제안하고 실측자료와 비교한 결과 BOD5, COD, SS와는 모델의 예측값이 잘 일치하는 경향을 보였고, TN, TP는 예측력이 다소 부족한 결과를 얻었다. 이 외에도 강우시

발생하는 비점오염원에 관련된 연구는 다수 있으나, 유출량 및 유출수질을 동시에 고려한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

지금까지의 국내의 도시수문 연구역사를 정리하면 [표 2]와 같다.

[표 2] 국내의 도시수문연구 역사

년도	저자 또는 기관	개발 내용 및 적용 현황
1975	김영환	도시화→유출시간 감소, 개발로 인한 홍수피해 증가. 미국동향소개
1980	이원환 등	도시화→침투유량증가. 하천 범람의 원인 제공 저류지와 같은 유수기능 확보 강조
“	전병호	수문학적 특성연구. 수문자료의 관측 필요. 대도시 개발시 수문관측 요구 도시수문 유출모형소개. 직접 유출량의 기록 부재 제기
“	이원환	유역의 단순화 정도와 정확성의 문제 제기
“	고재웅	지역적으로 구분 확률강우강도식 유도
1981	서병하 등	도시화 영향. 도시수문연구역사. 유역 저류방법 RRL모델 변형 적용 현 하수도망의 유수소통능력평가계획 실패←배수망의 정확한 자료. 실측유량자료 부재
1982	이은용 등	도시화율에 따라 침투유량 변화 RRL법을 이용한 실험. 실측유량의 부족으로 모델의 검정 미이행 향후 연구과제로 제안
1983	한국수문학회	The Santa Barbara Urban Hydrograph Method 소개(SBUH)
1988	고재웅	홍수량공식들을 조사. 같은 조건하에서 400%의 편차를 보이기도 함.
1990	최영박	토지개발→토지이용변화→홍수량 증가→홍수발생(침수피해) 토지이용변화 지형인자 치수계획에 미반영 지적. 홍수시 실제유량관측 빈곤
“	고재웅 등	도시화로 유출량 상승. 유출억제 시스템 개발 제안. 수문영향평가제 제안. 유출자료 관측시스템 필요(유출자료의 빈약)
“	이영대	URAM을 이용 모의실험. 침투특성은 정성적으로 실제와 일치. 소규모 단지의 유출해석시 용이함.
“	안상진 등	토지이용변화→홍수에 영향. 침투·보수특성 변화 연구필요→장단기 유출 영향 평가 연구
“	이원환	수리·수문자료에 대한 연구조사의 필요성 주장(외국의 사례조사)
“	표영평	도시화에 의한 수문특성변화 연구(외국은 정성적, 정량적 연구진행) 국내는 미진. 우수저류시설 개발 연구 필요
1991	전병호	ILLUDAS모형과 ILSD모형을 실제적용 분석
“	이종태 등	ILLUDAS모형과 ILSD모형을 선택하여 유출 수문곡선을 모의
“	이노성	도시화로 인한 유출량 증가. 도달시간 단축. 우수지 저류량을 산출 강우시 도시지역 유출의 수질특성에 대한 조사연구
1992	윤용남 등	합리식, Chicago Hydrograph Method, RRL, KPRRL, ILLUDAS 등의 모형을 같은 상황에 적용 비교 검토
1993	이종태 등	합리식, RRL, ILLUDAS모형 비교·분석
“	원석연 등	유역홍수추적모형+하도홍수추적모형을 합하여 표본설정후 검정
“	강주복 등	유출량 측정을 위해 이산화 입력-출력모형 적용
“	이원환 등	RRL, ILLUDAS, FLOOD등의 홍수량 공식의 장·단점을 비교 검토
“	원석연 등	합리식, KPRRL, BRRL, ILLUDAS모형 비교
“	신현석 등	SWMM 모형을 이용한 도시유역의 유출 및 NPS오염물질 배출을 모의

년도	저자 또는 기관	개발 내용 및 적용 현황
1994	주택연구소	5가지 도시유출모형적용(서울시 2개 유수지 대상)하여 평가
"	심재현	ILLUDAS모형을 사용, 재현기간 10~50년 적용 강우의 시간적 분포에 따른 유출사상의 변화 추이 실험
1995	서울시정개발 연구원	우수유출저감시설의 효과 분석
"	이관영	소도시 배수구의 오락부하량 추정
1996	김덕화 등	Convex, Muskingnm, 운동과법, 배수관거추적법의 유출 양상 비교·분석 도시유역하천은 배수관거를 고려한 하도추적법이 적당
"	한국회 등	도시유역의 경우 배수계통의 정비로 유속이 증가하므로 하천수위는 오히려 감소하는 것으로 판단
"	서규우 등	도시화를 3단계로 구분하여 ILLUDAS모형을 적용하여 총유출량, 침투유량, 침투도달시간의 변화정도 측정
"	이준호 등	강우시 합류식하수관 우러류수의 수질을 예측
"	한국토지공사	도시수문 및 우수관리기술 세미나 개최
"	"	주택단지내 시험유역의 수문자료 모니터링 시스템을 구축하고 수집된 수문 자료를 이용하여 도시유출모형을 적용함
1997	방기웅 등	도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구

5. 국내 도시수문연구의 방향과 향후과제

국내의 도시수문에 대한 연구는 1980년대에 시작하여 1990년대 들어 활발해지기 시작하였다. 그러나 도시수문연구에 필요한 기초적인 연구가 이루어지지 아니하고 외국의 사례를 적용하는데에만 연구가 집중되고 있는 편이다.

향후 국내에서 도시수문학에 대하여 연구해야 할 과제로는 우선 국내의 도시화에 따른 수문환경의 변화를 밝히는 것이다. 이를 위하여 도시유역에 대한 시험유역의 선정 및 운영관리가 요구된다. 아울러 도시의 물수지 요소들에 대한 측정평가 연구가 수행되고 이 결과에 의한 도시수문 구성요소간 관계규명이 이루어져야 한다.

그리고 다음으로 수문변화를 저감시킬 수 있는 개별적인 방법론에 대한 연구가 필요하다. 이는 수량 및 수질에 대한 개념을 통찰하여 수행되어야 한다. 개별적인 방법론별로 현장시험등 실제적인 계측관리가 이루어져야 실무에서 활용할 수 있는 설계기준 등을 제시할 수 있다.

다음은 위에서 연구되는 개별적인 방법론에 대한 연구결과를 종합하여 도시전체의 개념에서 적용하는 방법을 연구하여야 한다. 위에서 연구된 도시의 물수지와 연계하여 도시수자원을 보전하고 유지관리하는 기법에 대한 다양한 연구가 이루어져야 한다. 지표수, 지하수, 상하수도, 강수 등과 개개요소의 수량 및 수질에 대한 연구결과를 종합하는 연구가 별도로 수행되어야 한다.

그리고 도시의 우수관리를 친환경적인 개념과 생태적인 개념에 접목시키는 연구가 이루어져야 한다. 이는 범지구적인 차원의 지속가능개발을 가능하게하는 가장 기본적인 항목으로 수환경을 접목시키는 연구로 생활의 질이 향상될수록 이에 대한 요구는 날로 증대하고 수문기술자들도 이에 대응하는 연구를 수행하여야 한다.

다음으로는 수문기술자와 도시계획가가 공동으로 참여하는 도시계획시의 우수관리기법에 대한 연구가 이루어져야 한다. 도시수문학은 건설을 시행하는 토목분야를 포함하지만 또한 이에 못지 않게 중요한 부분은 계획분야에 속한다는 사실이다. 모든 도시를 계획할 때 이에 대한 평가가

없이는 이루어질 수 없다는 사실을 주지하여야 한다.

도시우수를 관리하는 일은 이제 더 이상 수문학으로만 제한되지 않는다. 곧 도시우수관리는 도시를 계획할 때부터 심도있게 다루어져야 하고 그래야만 각각의 개별적인 방법론이 의미있는 수단이 될 것이며, 경제적인 접근이 가능하다.

6. 결론

이상에서 도시수문의 정의와 구성요소에 대하여 알아보고 연구동향을 국내외에 걸쳐 조사하여 국내에서 향후에 도시수문분야에서 연구하여야 할 과제들을 정리해 보았다.

현재까지 국외에서는 수량에 대한 연구와 수질에 대한 연구를 거의 동시에 추진해 왔고 이 두가지를 만족시키는 분야를 연구하면서 생태적인 면과 환경적인 면을 추가하여 연구하고 있으며 이러한 연구들을 총체적으로 엮는 단계에 와 있으며 이는 BMPs라는 유역단위의 우수관리기법을 연구하여 도시계획시에 적용하고 있다.

앞으로 국내에서 연구되어야 할 도시수문분야의 과제는 도시화가 수문특성에 미치는 영향부터으로부터 수량과 수질부문을 결합하여 연구하는 과제가 추진되어야 하고, 이들의 연구결과를 친환경적인 도시조성을 위한 생태적인 접근의 연구와 연결하는 과제가 수행되어야 한다. 이러한 총괄적인 연구가 이루어지면 도시계획시 수문기술자와 도시계획가가 동시에 참여하여 도시를 계획할 때 실제적으로 이러한 방법들을 적용하는 단계가 반드시 있어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 고재웅. 1980. “도시화에 따른 수문현상의 변동”. 한국수문학회지, 제13권 제2호.
- 고재웅 등. 1990. “90 중부지방 대홍수의 원인과 대책 좌담회”. 대한토목학회지, 제38권 제5호.
- 국립환경연구원, 1989, 한국환경과학연구협의회, 하천 및 호수수질의 최적화 관리방안, 세계환경의 날 기념 학술세미나.
- 김갑수 등. 1995. 우수유출률 저감 대책. 서울시정개발연구원.
- 방기웅, 1990, 하구담수호 수질예측모형의 개발,서울시립대학교 박사학위 논문, pp.86-87.
- 방기웅, 이준호, 유명진, 1997, 도시소유역에서의 비점오염원 유출특성에 관한 연구, 한국수질보전학회지, 제13권 제1호, pp.70-99.
- 서병하 등. 1981. “도시하수도망의 수문학적인 평가와 설계확률유량의 점대화 성향에 관한 연구(제1보)”. 한국수문학회지, 제14권 제4호.
- 신현석, 윤용남, 1993, SWMM 모형을 이용한 도시유역의 유출 및 NPS 오염물질 배출 모의, 한국수문학회지, 26(3), 125-135.
- 신현석, 윤용남, 1993, 도시소유역에서의 유출과 비점오염물질 배출간의 상관관계 수립에 의한 NPS 오염물 배출량의 산정, 한국수문학회지, 26(4), 85-95.
- 이관영, 1995, 소도시 배수구의 오탉부하량 추정에 관한 연구, 대한상하수도학회지, 1, 89-95.
- 이노성, 1991, 강우시 도시지역 유출의 수질특성에 대한 조사연구, 서울대학교 보건대학원, 석사학위 논문.
- 안상진, 이종형. 1990. “토지이용의 변화와 홍수유출모델”. 한국수문학회지, 제23권 제1호.
- 윤용남, 원석연. 1992. “도시유역의 홍수량산정을 위한 도시홍수유출모형의 연구”. 대한토목학회 1992년도 학술발표회 개요집.
- 이영대 등. 1990. “도시소유역의 유출해석을 위한 수문모형의 개발과 응용”. 한국수문학회지, 제23권 제3호.
- 이원환. 1980. “도시하천에서의 수해”. 한국수문학회지, 제13권 제2호.
- 이은용 등. 1982. “확정론적 모의기법에 의한 도시유출해석에 관한 연구”. 한국수문학회지, 제15권 제3호.
- 이재철. 1995. “단지내 친수공간의 물확보 방안”. 토지개발기술지 여름호, 한국토지공사.

- 이종태 등. 1993. “도시유역의 유출해석을 위한 SWMM모형”. 대한토목학회 1993년도 학술발표회 개요집.
- 이준호, 방기용, 1996, 강우시 합류식하수관 월류수의 수질예측, 대한환경공학회 춘계학술연구발표회, 179-183.
- 전병호. 1980. “도시화에 따른 우수유출의 양적결정”. 한국수문학회지, 제13권 제2호.
- 전병호, 선우중호. 1980. “도시소유역의 수문곡선 모의”. 대한토목학회논문집, 제28권 제4호.
- 전병호, 이형기, 구자공, 신항식. 1988. “개인전산기를 이용한 도시합류관거의 흐름해석”. 대한토목학회논문집, 제8권 제1호.
- 전병호. 1991. “소규모단지의 유출모의와 도시화 효과에 관한 연구”. 한국수문학회지, 제24권 제2호.
- 최영박. 1989. “도시홍수와 수방대비”. 토지개발기술지 하계호, 한국토지공사.
- 최지용, 1994, 중소수계의 수질관리를 위한 장기 비점오염원 모델의 개발, 한국과학기술원, 박사학위논문.
- 최진국 등. 1994. 택지개발지구의 수리해석기법 연구. 주택연구소.
- 표영평. 1990. “도시유출과 수방대책에 관한 연구”. 대한토목학회, 제38권 제5호.
- 한국토지공사, 1996, 주택단지내 수문자료 모니터링 시스템 구축에 관한 연구.
- 한국토지개발공사. 1989. 도시소규모 단지의 우수유출량 산정기법에 관한 연구.
- 환경부, 공해공정 시험법, 환경부, 1995.
- 新井 正, 新藤靜夫, 市川 新, 吉越昭久. 1986. 都市の 水文環境.
- Abbott, J., 1977, Guidelines for calibration and application of STORM, Hydrologic Engineering Center, U.S.Army Corps of Engrs., Davis, CA.
- American Public Works Association, 1969, Water pollution aspects of urban runoff, 11030DNS01/69, Federal Water Pollution Control Administration, Washington, DC.
- APHA, AWWA, and WPCF, 1992, Standard Method for the examination of water and wastewater, 18th Ed., APHA. N. Y.
- Bedient, P.B., Lambert, J.L. and Springer, N.K., 1980, Stormwater pollution load-runoff relationship, Journal of Water Poll. Control

Fed., 52(9), 2396-2404.

- Brown, R.G., 1984, Relation between quantity and quality of storm runoff and various watershed characteristics in Minnesota, USA, Proc. Third Int. Conf. on urban storm drainage, Chalmers Univ. of Technology, Goteborg, Sweden, Vol. 3, pp. 791-800.
- Cermola, J.A., DeCatli, and Sachdev, D.R., 1979, SWMM application to combined sewage in New Haven, Journal of Environmental Engineering Div. ASCE, 105(EF6), 1035-1048.
- Chen, C.K., and Saxton, W.W., 1973, Combined wastewater overflows, Journal of Water Poll. Control Fed., 45(3), 434-447.
- Collins, P.G., Ridgwat, J.W., 1980, Urban storm runoff quality in southeast Michigan, Journal of Environmental Engineering Div. ASCE, 106(EF1), 153-162.
- Colston, N.V., 1974, Characterization and treatment of urban land runoff, U. S. EPA.
- Di Toro, D.M., 1984, Probability model of stream quality due to runoff, J. of Environmental Engineering, ASCE, Vol. 110, No. 3, pp. 607-628.
- Di Toro, D.M., and Small, M.J., 1979, Stormwater interception and storage, J. of Environmental Engineering Div., ASCE, Vol. 105, No. EF1, pp. 43-54.
- Dodson, 1991, Prostorm:User's manual and program reference, Dodson & Associate, Inc., Houston, Texas.
- Driscoll, E.D., Di Toro, D.M., and Thomann, R.V., 1979, A statistical method for assessment of urban runoff, EPA-440/3-79-023, U.S.EPA, Washington, DC.
- Fam S., Stenstorm, M. K. and Silverman, H., 1987, Hydrocarbons in urban runoff, Journal of Environmental Engineering Div. ASCE, 113(5), 1032-1046.
- Featherstone R. E. 등, Editor. 1982. Urban Drainage Systems. Proc. 1st. International Seminar on Urban Drainage Systems, England.
- Field, R., and O'Shea, M.L., 1993, Integrated stormwater management, Lewis Pub., Ann Arbor, pp.3-120.
- Field, R., and Struzeski, E.J., 1972, Management and control of combined sewer overflows. Journal of Water Poll. Control Fed.,

44(7) 1393-1414.

- Field, R., and Fan, C.Y., 1981, Industrial reuse of urban stormwater, *Journal of Environmental Engineering Div. ASCE*, 107(EF1), 171-189.
- Field, R., and Turkeltaub, R., 1981, Urban runoff receiving water impacts: Program overview, *Journal of Environmental Engineering Div. ASCE*, 107(EF5), 957-974.
- Freedman, P.L., et al., 1980, Modeling storm overflow impacts in eutrophic lake, *Journal of Environmental Engineering Div. ASCE*, 106(2).
- Hall, M. J. 1984. *Urban Hydrology*.
- HEC, 1977, *Storage, Treatment, Overflow, Runoff Model, STORM, User's Manual*, Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engrs., Davis, CA.
- Heaney, J.P., Nix, S.J., and Murphy, M.P., 1978, Storage-treatment mixes for stormwater control, *Journal of Environmental Engineering Div. ASCE*, 104(EF4), 581-592.
- Heaney, J.P., Huber, W.C., Skeith, H., Medina, M.A., Doyle, J.R., Peltz, W.A., and Darling, J.E., 1975, *Urban stormwater management modeling and decision making*, EPA-670/2-75-022, U.S.EPA, Cincinnati, OH.
- Hoffman, E.J., Latimer, J.S., Mills, G.L., and Quinn, J.G., 1982, Petroleum hydrocarbons in urban runoff from a commercial land use area, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 54(11), 1517-1525.
- Howard, C.D.D., 1976, Theory of storage and treatment-plant overflows, *J. of Environmental Engineering Div., ASCE*, Vol. 102, No. EF4, pp. 709-722.
- Huber, W.C., and Dickonson, R.E., 1988, *Storm Water Management Model Version 4, User's Manual*, EPA-600/3-88-001a, EPA, Athens, GA.
- Hunter, J.V., Sabatino, T., Gomperts, R., and MacKenzie, M.J., 1979, Contribution of urban runoff to hydrocarbon pollution, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 51(8), 2129-2038.
- Jandel Scientific Co., 1994, *SigmaPlot User's Manual*.
- Jefferies, C., and Dickson, R.A., 1991, *The design, construction and*

- performance assessment of Storm King storm-sewage overflow, *Journal of IWEM*, 150-157.
- Jewell, T.K., and Adrian, D.D., 1981, Development of improved stormwater quality models, *Journal of Environmental Engineering Div. ASCE*, 107(EF5), 957-974.
- Kibler, D. F. Editor. 1982. *Urban Stormwater Hydrology*. American Geophysical Union(Urban Hydrology Committee).
- Klemeston, S.L., 1985, Factors affecting stream transport of combined sewer overflow sediments, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 57(5), 390-397.
- Lape, J., and Dwyer, T.J., 1994, Controlling combined sewer overflows(CSOs):EPA's CSO control policy, *Proceeding of the 1994 WERF, Kentucky Tenn.*, pp.O-1~O-18.
- Line, D.E., Arnold, J.A., Jennings, G.D., and Jy Wu, 1996, Water Quality of Stormwater Runoff from Ten Industrial Sites, *Water Resources Bulletin*, Vol.32, No.4.
- Loehr, R.C., 1974, Characteristics and comparative magnitude of non-point sources, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 46(8), 1849-1872.
- Maksimovic, C., M. Radojkovic, Editor. 1986. *Urban Drainage Modeling*. Proc. of Urban Drainage Modeling '86(UDM '86)-International Symposium on Comparison of Urban Drainage Models with Real Catchment Data, IAHR/IAWPRC.
- Maksimovic, C., M. Radojkovic, Editor. 1986. *Urban Drainage Catchments*. Selected worldwide rainfall-runoff data from experimental catchments.
- Maksimovic, C. Editor. 1991. *New Technologies in Urban Drainage-UDT '91*. Int. Conference on Urban Drainage and New Technologies UDT '91, Yugoslavia, UNESCO.
- Nix, S.J., 1994, *Urban stormwater modeling and simulation*, Lewis Pub. Ann Arbor, pp.15-84.
- Polls, I., and Lanyon, R., 1980, Pollutant concentration from homogeneous land uses, *Journal of Environmental Engineering Div. ASCE*, 106(EF1), 69-80.
- Sartor, J.D., and Boyd, G.B., 1972, *Water pollution aspects of street*

- surface contamination, EPA R2-72-081, U.S.EPA, Washington, DC.
- Sartor, J.D., Boyd, G.B. and Agardy, F.J., 1974, Water pollution aspects of street surface contaminants, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 46(3), 458-467.
- Sheaffer, J. R., K. R. Wright. 1982. *Urban Storm Drainage Management*.
- U.S.EPA, 1992. NPDES Stormwater Sampling Guidance Document. U.S.Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, D.C., EPA 833-B-92-001, 123pp.
- U.S.EPA, 1993, Urban runoff pollution prevention and control planning, EPA/625/R-93/004.
- Walesh. S.G. 1989. *Urban Surface Water Management*.
- Wanielista, M.P., Y.A. Yousef. 1993. *Stormwater Management*.
- Whipple, W., and Hunter, J.V., 1981, Settleability of urban runoff pollution, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 53(12).
- Whipple, W., Hunter, J.V., and Yu, S.L., 1977, Nonpoint sources and planning for water planning for water pollution control, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 15-23.
- Whipple, W., Hunter, J.V., and Yu, S. L., 1974, Unrecorded pollution from urban runoff, *Journal of Water Poll. Control Fed.*, 46(5), 873-885.
- Whipple, W. Jr., Editor. 1978. *Water Problems of Urbanizing Areas*. Proc. of Research Conference on Water Problems of Urbanizing Areas, U.S.A., ASCE.
- Yen, B.C. Editor. 1987. *Topics in Urban Drainage Hydraulics and Hydrology*, Proc. of IV Int. Conference in Urban Storm Drainage. IHAR.