

청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용 Application of WEP Model to the Cheonggyecheon Watershed

노성진* / 김현준** / 장철희***

Noh, Seong Jin / Kim, Hyeon Jun / Jang, Cheol Hee

Abstract

Water cycle analysis in the Cheonggyecheon watershed (river length: 13.75 km, area: 50.96 km²) was performed using WEP model, a physically based distributed rainfall-runoff model. As the application results of the model, the hydrological characteristics of the Cheonggyecheon watershed are significantly consistent with those of a typical urbanized watershed. The direct runoff from the watershed was larger and the evapotranspiration was lower, and the response of runoff to rainfall was occurred very fast, as compared to forest watersheds. The river channel routing simulation results are similar to the change pattern and scale of the field data. The possible supply period of instream flow from Cheonggyecheon watershed itself was estimated using WEP. According to the WEP simulation results for the annual water balance of the Cheonggyecheon watershed in 2002, the amount of direct runoff, infiltration and evapotranspiration were 830 mm, 388 mm and 397 mm respectively for an annual precipitation of 1,388 mm. The runoff to rivers was 1,288 mm. And the proportion of direct runoff, intermediate runoff and groundwater runoff were 67.6%, 12.7% and 19.7% respectively.

keywords : water cycle analysis, WEP model, distributed rainfall-runoff model, Cheonggyecheon watershed

요 지

청계천 유역(유로연장: 13.75 km, 유역면적: 50.96 km²)의 물순환 해석에 물리적 개념의 공간 분포형 강우-유출 모형인 WEP 모형을 적용하였다. 모형 적용 결과, 청계천 유역은 전형적인 도시 유역의 특성을 나타내었는데, 강우 시의 지표면 유출량이 크고, 강우의 유출에 대한 반응이 빠르며, 증발산의 경우는 산림지역보다 도시지역이 상대적으로 적었다. 또한 관측값과 비교한 결과 청계천의 하천 유출을 모의하기에 적절함을 알 수 있었고, 이를 토대로 청계천 유역 자체의 복원후 유지유량 공급능력에 대해 추정하였다. WEP 모형의 적용 결과, 2002년 청계천 유역의 물수지는 연간 1,388 mm의 강우에 대하여 830 mm의 지표면 유출이 발생하고 388 mm가 침투되며 397 mm가 증발산에 의해 대기중으로 방출되었다. 하천유출량은 1,288 mm로 이 중 지표면 유출, 중간 유출, 지하수 유출의 비율은 각각 67.6%, 12.7%, 19.7%이었다.

핵심용어 : 물순환 해석, WEP 모형, 분포형 강우-유출 모형, 청계천 유역

* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-721, Korea
(e-mail: sjnoh@kict.re.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원
Research Fellow, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-712, Korea

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원
Researcher, Water Resources Research Dept., KICT, Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-721, Korea

1. 서론

도시지역은 개발이 진행됨에 따라 불투수면 증가 및 침투량 감소로 홍수의 발생빈도는 증가하는 반면, 평시 하천유량 감소 및 오폐수 배출량 증가로 수질오염이 심화되는 등 물순환 구조가 왜곡되고 있으며 결국 이는 수자원의 손실로 이어지고 있다(그림 1 참조). 이러한 도시화로 인한 물순환 환경의 변동을 파악하여, 치수, 이수 및 환경 측면에서 건전한 도시 지역의 물순환 체계를 회복하기 위해서는 유역내 물순환계에 대한 정량적인 이해와 이를 위한 해석 모형이 필수적이다. 본 연구에서는 도시유역이며 최근 하천 복원공사가 이루어지고 있는 청계천 유역에 대해 WEP(Water and Energy Transfer Process) 모형을 적용하여 유역의 시간적, 공간적 물순환 특성을 분석하고 국내 도시유역의 적용성을 검토하였다.

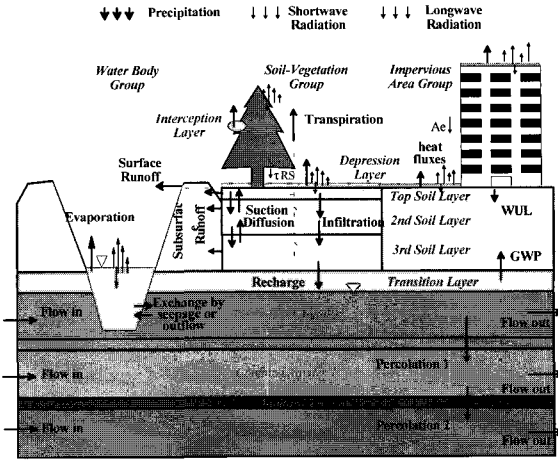


그림 2. WEP 모형의 연직 구조(土木研究所, 2002)

3. 모형의 적용 및 결과

3.1 적용유역

청계천은 서울의 서북쪽에 위치한 인왕산과 북한산의 남쪽 기슭, 남산의 북쪽 기슭에서 시작하여 서에서 동으로 서울의 도심부를 흐르는 유로연장 13.75 km, 유역면적 50.96 km²의 도시하천이다. 지류로는 성북천과 정릉천을 포함하고 있으며, 하상경사는 1/310~1/510 정도이다. 표층토양은 암석 4.0%, 미사질양토 25.3%, 미사질식양토 33.0%, 식양질토 35.9%로 대부분이 양토(Loam)로 이루어져 있다. 유역내 행정구역은 강북구, 동대문구, 성동구, 성북구, 종로구, 중구의 총 6개구 86개동이고 유역내 인구는 120만명이 넘는다. 유역내 수위관측소는 그림 3에서 보듯이 청계천과 정릉천 하류부인 제2마장교와 용두교에 1999년 각각 설치되어 운영하고 있다(서울특별시, 2003).

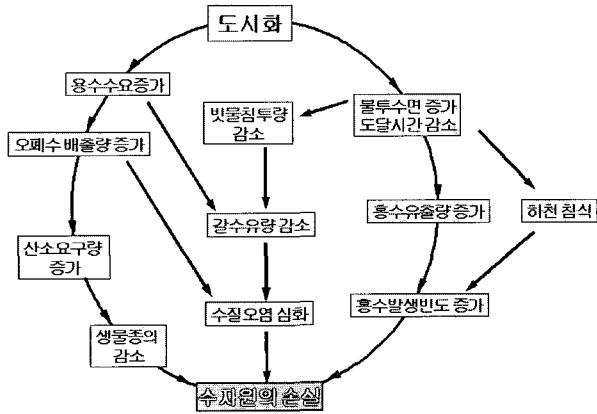


그림 1. 도시화가 물순환에 끼치는 영향 (Delleur, 2003)

2. 모형의 개요

WEP 모형은 일본의 토목연구소에서 유역 물순환의 정량화와 유역변화의 영향예측을 위해 개발된 물리적 개념의 공간 분포형(Physically Based Spatially Distributed) 강우-유출 모형이다. 증발산, 침투, 지표면 유출 등 각각의 수문요소를 격자단위로 해석한다. 각 격자별로 그림 2와 같은 연직 구조로 물순환을 모형화하며, 모자이크법을 통한 다양한 토지이용 정보의 반영 및 침투시설, 저류지 등 유출저감시설의 영향 모의가 가능하다(土木研究所, 2002). 본 모형은 일본 동경의 물·열순환 해석에 적용되었으며(Jia, 1997), 일본과 중국의 여러 유역의 유역단위 물순환 해석에 이용되었으며(Jia 등, 2001; Ni 등, 2001; Jia, 2004), 국내에서는 2003년 소개된 이후(Kinouchi 등, 2003), 도시 유역의 물순환 해석에 적용되고 있다(과학기술부, 2004).

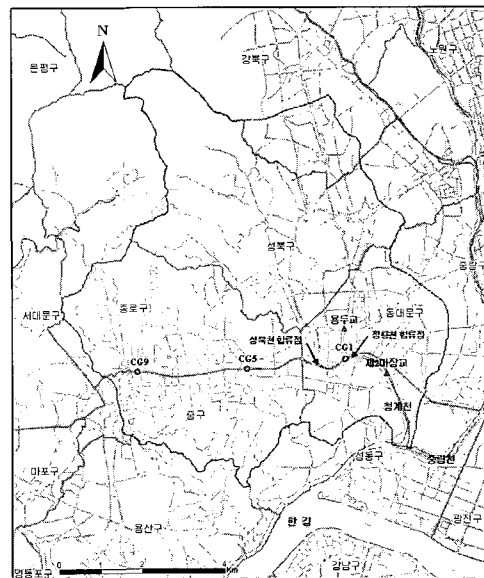


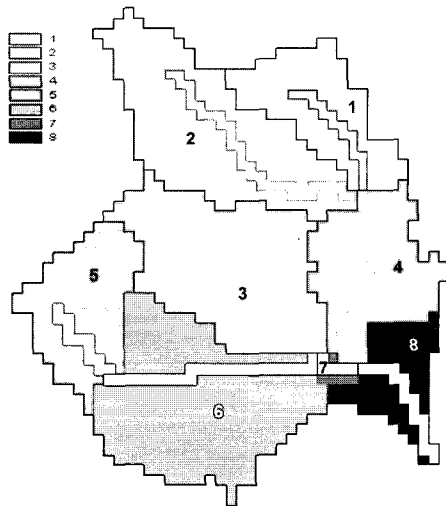
그림 3. 청계천 유역도

3.2 입력자료 구축

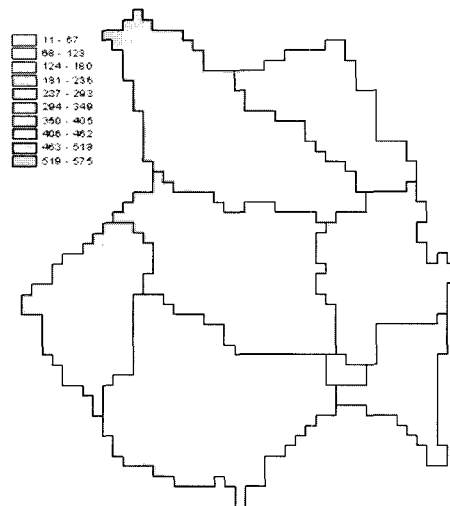
WEP 모형의 입력 자료를 그 특성에 따라 분류하면 대상구역(구역분할, 인구분포 등), 기상 조건, 지표면 조건, 표층토양, 하천, 지하대수층, 인공계 용수, 초기·경계 조건 등으로 나눌 수 있다. 청계천 유역을 200 m×200 m의 격자로 나누고(남북방향 54개, 동서방향 54개), 유역을 8개의 소유역으로 분할하였으며 하천은 물리적 특성(경사, 단면 등)과 관측결과와의 비교 지점 등을 고려하여 26개의 세부하천으로 구분하였다(그림 4(a)). 수치고도 자료를 이용하여 각 격자의 지표면 표고(그림 4(b))와 경사(그림 4(c))를 결정하고 이로부터 유하방향(그림 4(d))을 계산하고 각 격자에 상류로부터 표면류가 전달되는 총 격자수를 더하여 그림 4(e)의 흐름 누적 격자 정보를 계산하였다. 그림 4(f)의 토지이용은 격자크기 25 m의 자료를 이용하여

한 격자(200 m×200 m)내에 64개의 세부 토지이용정보가 들어가도록 하였다(모자이크 법). 그림 4(g)는 GIS 프로그램을 통해 구축한 표층토양 자료이며 그림 4(h)의 인구분포 자료는 구청별 인구통계 자료와 토지이용정보를 이용하여 격자별 인구수를 산정하였다. 강우, 풍속, 일조시간, 기온, 상대습도 등 기상 조건에 대한 자료는 1998년부터 2002년까지의 기상청 서울 측후소 자료를 이용하였다.

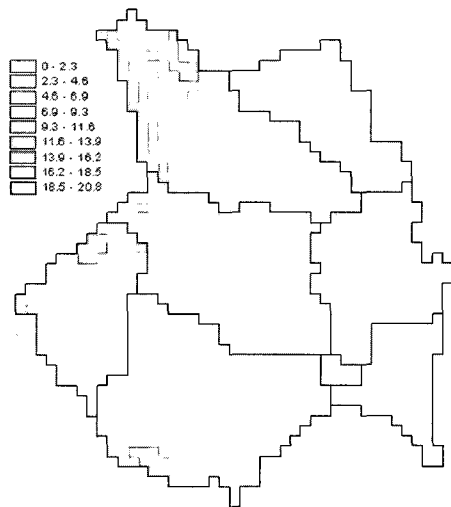
입력자료 중 표층토양, 지하대수층, 하천, 인공계 용수 등에 대한 내용은 표 1과 같다. 표층토양의 두께는 모형의 기본값인 2 m로 설정하였고 투수계수, 저류계수 등 대수층 관련 매개변수는 유역전체에 대한 분포형 자료가 미비하여 청계천 복원공사시 측정된 자료를 바탕으로 격자별로 동일한 값을 사용하였다. 하천에 대한 자료중 하상재료 깊이 및 투수계수는 현장 측정된 자료가 없어 모형의 기본값을 사용하였고, 하천의 상·하부



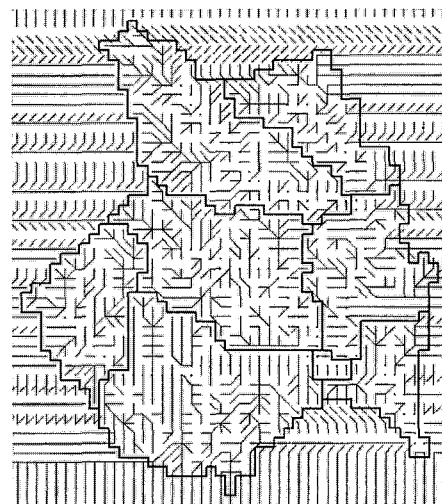
(a) 소유역 및 하천



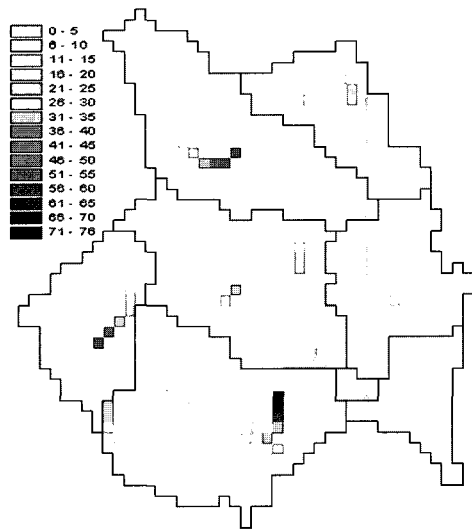
(b) 지표면 표고



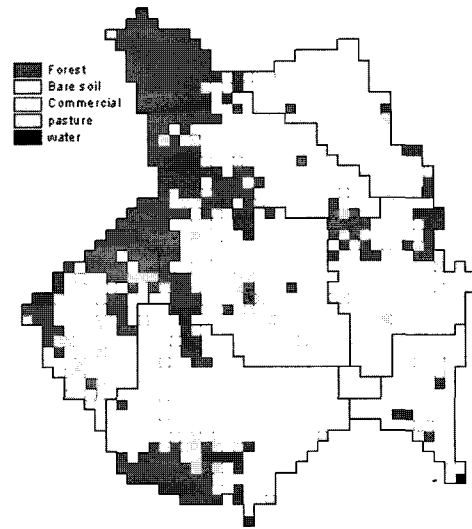
(c) 지표면 경사



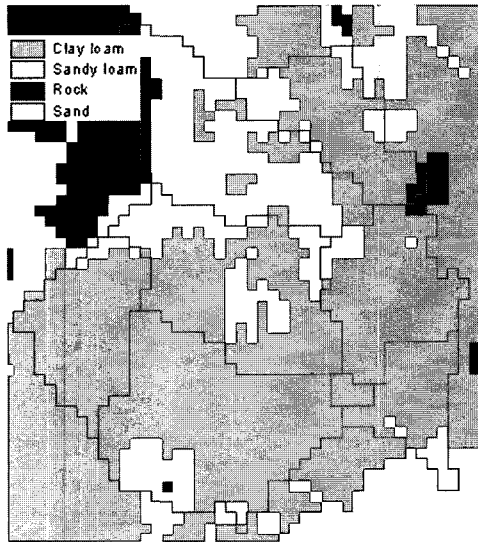
(d) 흐름 방향



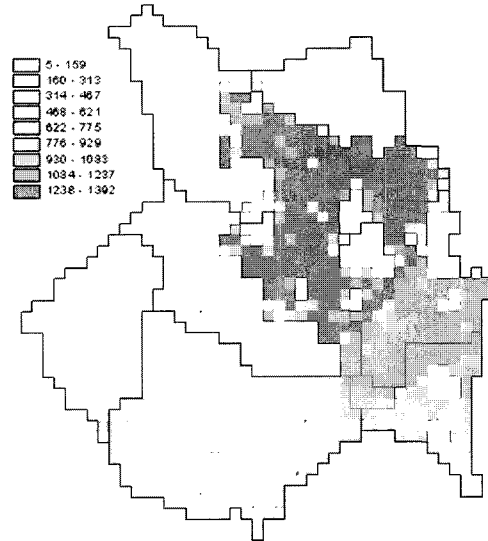
(e) 표면류 흐름 누적



(f) 토지이용



(g) 표층토양



(h) 인구분포

그림 4. 청계천 유역에 대한 WEP 모형의 입력자료 분포도

폭 및 하도경사는 기존 연구(서울특별시, 2003)에서 제시한 값을 사용하였다. 조도계수는 표면류 격자와 하천에 대해서 구별되어 입력되는데, 표면류 격자의 조도계수는 해당 격자의 토지이용 특성 등을 고려하여 모형 내에서 자동적으로 계산되며, 하천의 조도계수는 세부 구간별로 사용자가 입력한다. 본 연구에서 하천의 조도계수는 26개의 세부하천단면에 대하여 청계천과 정릉천의 분류 구간은 기존 연구(서울특별시, 2003)에서 제시한 값을 사용하고, 자료가 부족한 상류 산지부근의 단면에 대해서는 보정후 선택된 값을 사용하였다. 인공계용수중 상수도 이용량과 누수율은 기존의 자료(환경부, 2004)에서 서울시에 대한 통계값을 사용하였고, 공장용수량과 간이상수도 사용량은 관련 자료 부족으로 고려

하지 않았다.

3.3 모형의 적용

3.3.1 모의 조건

표층토양의 초기 함수율과 초기 지하수위 등 초기 계산 시작 조건의 영향을 줄이기 위해 1998년부터 2000년까지의 기간을 모의한 후 2000년 12월 31일 24:00의 조건을 초기조건으로 2001년 1월 1일 01:00에서 2002년 12월 31일 24:00까지 2년간을 모의하였다. 이 중 2001년 자료는 모형의 보정에, 2002년 자료는 검정에 각각 사용하였다. 모형의 매개변수가 모의결과에 미치는 민감도에 대해서는 Jia 등(2003)에 의해 연구된 바 있으며, 본 연구에서는 도시지역의 불투수율, 하천의 조도계수

표 1. WEP 모형의 입력자료 구성

구분	내용	비고	
표층 토양	종류	4(Clay loam, Sandy Loam, Rock, Sand)	
	깊이(m)	2	모형 기본값
대수층	깊이(m)	층1: 39(평균) 층2: 17.3(평균) 층3: 30 층4: 50 층5: 100	
	투수계수(m/s)	층1: 1.7×10^{-5} 층2: 1.0×10^{-6} 층3: 5.0×10^{-7} 층4: 3.0×10^{-8} 층5: 1.0×10^{-8}	
	저류계수	층1: 1.4×10^{-2} 층3: 4.0×10^{-2} 층5: 2.0×10^{-1}	
하천	하상재료 깊이(m)	0.1	모형 기본값
	하상재료 투수계수(m/s)	0.6×10^{-5}	모형 기본값
	하천 상·하부폭(m)	상부폭: 5~160 하부폭: 4~60	기존 단면 측량 자료
	하도경사	0.00066~0.05	수치고도 자료 이용
	조도계수	0.03~0.075	기존 자료 및 보정
인공계용수	상수도 이용량 ($m^3/day/person$)	0.368	상수도 통계 (환경부, 2002)
	상수도 누수율	0.123	
	공장용수량(지하수) (m^3/day)	0	
	간이상수도(지하수) (m^3/day)	0	

등을 보정하였다. 모의시 시간간격은 1시간으로 하였으며, PC(Pentium 4, 2.8 Ghz, 512M RAM)에서 2년을 모의하는데 30분 정도가 소요되었다.

3.3.2 물순환 모의 결과

WEP 모형의 모의 결과, 2002년 청계천 유역의 연간 물수지는 다음의 그림 5와 같다. 연간 1,388 mm의 강우에 대하여 830 mm의 지표면 유출이 발생하고 388 mm가 표층토양으로 침투되며 397 mm(불투수층: 146.3 mm, 투수층: 26.2 mm, 표층토양: 224.4 mm)가 증발산에 의해 대기중으로 방출되었다. 상수도 공급량 2,406 mm 중 누수량이 296 mm로 인공적인 요소가 전체 물수지에 큰 비중을 차지하였다. 하천유출량은 1,228 mm로 이 중 지표면 유출, 중간 유출, 지하수 유출의 비율은 각각 67.6%, 12.7%, 19.7%로 지표면 유출의 비율이 큰 도시유역의 특징을 나타내었다. 상수도 누수량 등의 영향을 감안한다면 강우가 중간 및 지하수 유출량에 미치는 영향은 훨씬 적을 것으로 판단되며, 이는 자연유역에 비해 청계천 유역의 물순환이 단절·왜곡되어 있음을 보여주는 단적인 예라 할 수 있을 것이다.

소유역별 물수지는 표 2에서 보듯이 각 소유역의 특성에 따라 물순환이 서로 다른 양상을 보이는데 이 중 도시화된 정도를 나타내는 지표라 할 수 있는 불투수 면적비율과 지표면 유출, 침투, 증발산은 연관이 깊은 것으로 나타났다. 불투수 면적비율이 높은 소유역일수록 증발산, 침투가 적고 지표면 유출이 많았는데, 표 2에서 보듯이 불투수 면적비율이 0.94로 가장 높은 7번 소유역은 0.41로 가장 낮은 2번 소유역에 비해 침투량

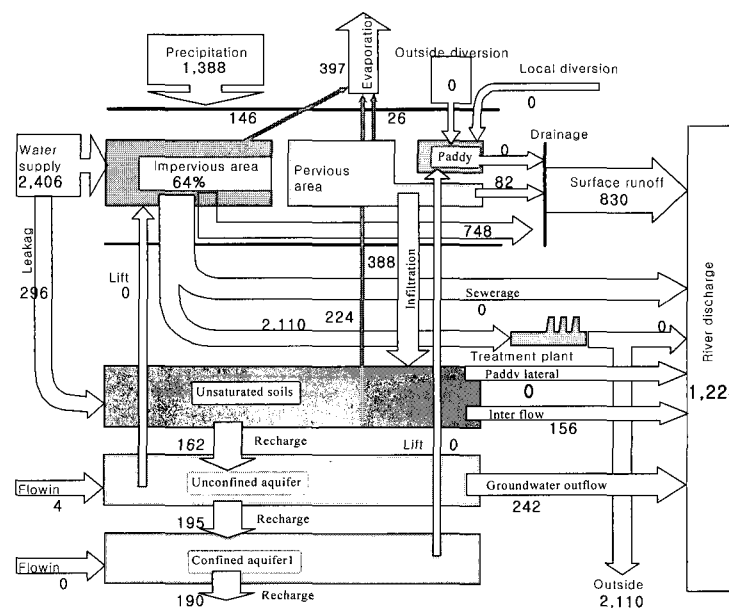


그림 5. 청계천 유역 전체 물수지(2002)

표 2. 소유역별 연간 물수지(2002)

구 분	계	1	2	3	4	5	6	7	8
면적(km ²)	50.8	4.2	9.6	9.6	6.0	5.6	10.2	0.4	3.2
불투수 면적비율	0.64	0.83	0.41	0.65	0.75	0.48	0.72	0.94	0.81
강수량(mm)	1,388	1,388	1,388	1,388	1,388	1,388	1,388	1,388	1,388
증발산(mm)	397	302	512	390	353	468	361	251	327
지표면 유출(mm)	830	1,000	635	822	943	642	892	1,097	1,036
침투(mm)	387	192	623	397	252	603	314	77	148
중간 유출(mm)	156	120	81	218	249	150	128	0	208
지하수 유출(mm)	242	163	224	107	1,019	110	68	510	160
하천 유출(mm)	1,228	1,283	939	1,147	2,211	902	1,088	1,607	1,403
상수도 공급(mm)	2,406	3,065	2,122	2,482	3,624	888	2,035	4,127	3,352

은 500 mm 이상 적고, 증발산도 절반 정도였지만, 지표면 유출은 거의 두 배에 이르렀다.

청계천 유역은 고도로 도시화된 지역으로 지표하에는 수많은 지하철 노선들이 얽혀 있어 지하 대수층이 교란되어 있고, 각종 관정 및 지하철 역, 대형건물로부터의 지하수 양수량이 지하수위에 영향을 줄 것으로 예상되지만, 이에 대한 자료 부족으로 본 연구의 모의시에는 인공구조물 및 양수량의 영향이 반영되지 않았다. 표 2에서 4번, 7번 소유역은 불투수 면적비율이 높음에도 지하수 유출량이 1,019 mm, 510 mm로 비교적 높게 모의 되었는데, 이는 부족한 지하 대수층의 입력자료의 영향으로 판단된다. 지하철 등의 인공 지하구조물이 건설되기 이전의 청계천 유역 지하수위는 지형적인 영향을 주로 받으면서 분포하였다는 연구(김윤영, 2004)에서 보듯이, 비교적 평균 해발고도가 낮은 4번, 7번 소유역은 지하 대수층의 인위적인 교란이 없는 조건에서 다른 소유역보다 상대적으로 지하수위가 지표에 가깝게 모의되어 지하수 유출량이 크게 모의된 것으로 판단되며, 도시유역의 지하수 유동 해석을 위해서는 지하 구조물 및 양수량 등에 대한 보다 광범위한 자료가 필요하다.

WEP 모형은 격자 기반 모형으로 기본적으로 격자단위로 계산되는 수문 요소의 공간분포를 파악할 수 있

다. 그림 6은 모의 결과 중 2002년의 각 격자별 연간 증발산량과 지표면 유출량의 공간분포를 나타낸 것이다. 그림 6(a)에서 보듯이 산림 및 녹지가 많고 불투수 면적비율이 낮은 지역 격자의 증발산이 높았는데, 북한산, 인왕산, 남산 등의 산지와 경복궁, 창덕궁 등의 고궁이 있는 격자의 증발산이 도시지역보다 높은 것으로 분석되었다. 지표면 유출은 증발산과는 반대의 결과를 보였으며, 도시지역에서는 대부분 800 mm 이상의 높은 지표면 유출을 나타내었다.

3.3.3 하천 유출 모의 결과

하천 유출 모의 결과 중 제2마장교와 용두교 지점에 대한 강우시의 수문곡선을 관측값과 비교하여 그림 7에, 관측 유량과 모의 유량을 비교하여 그림 8에 도시하였다. 비교에 사용된 실측값은 각 지점 수위관측소의 1시간 평균 자료를 보정후 유량으로 환산하여 사용하였다. 모의 시간간격이 1시간으로 하도추적에는 다소 긴 시간간격임에도 불구하고 실측값의 변화양상, 크기와 비슷한 모의결과를 나타내었다. 그림 8에서 보듯이, 결정계수는 제2마장교 지점에서 보정 및 검정 기간에 대해 각각 0.90, 0.78, 용두교 지점에서는 각각 0.92, 0.78로 비교적 양호한 결과를 보여주었으며 WEP 모형이 청계

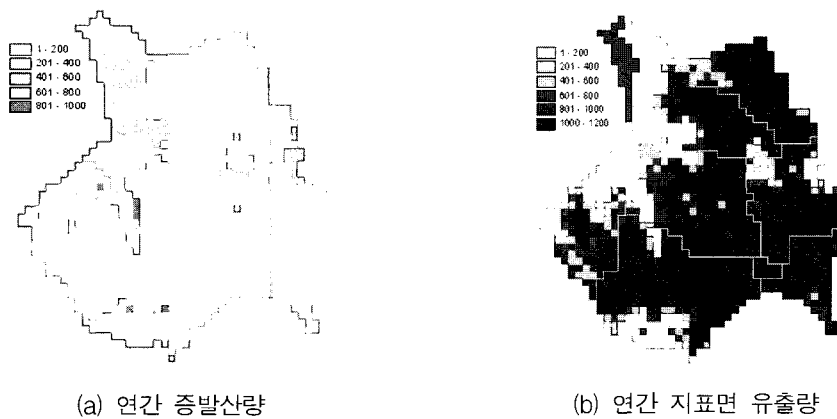
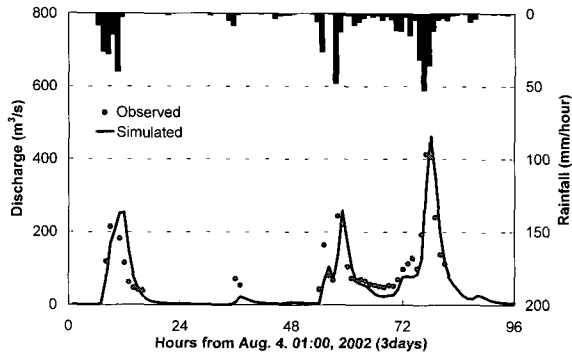
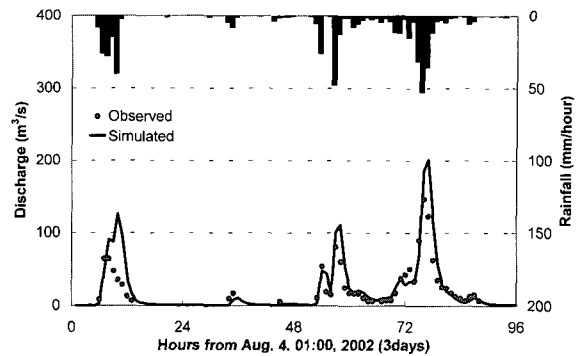


그림 6. 수문 요소의 공간분포(2002)

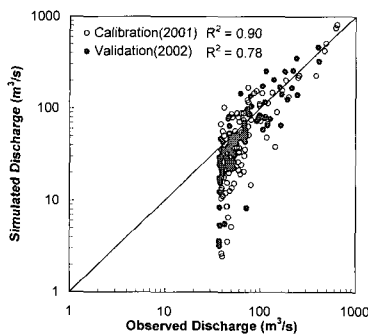


(a) 제2마장교

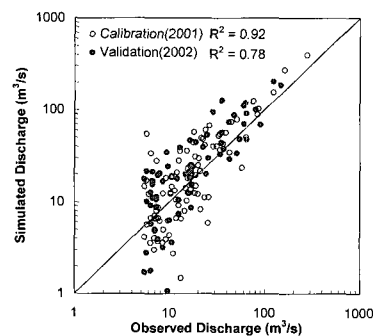


(b) 용두교

그림 7. 관측치와 모의결과의 수문곡선 비교



(a) 제2마장교



(b) 용두교

그림 8. 관측 유량과 모의 유량의 비교

천의 하천 유출을 모의하기에 적절함을 검증할 수 있었다.

3.3.4 청계천 유역 유출 특성 분석

그림 9는 청계천 본류의 각 공구별 유출 수문곡선을 나타낸 것으로 각 지점의 유역면적 및 유로연장 등은 표 3과 같으며, 위치는 그림 3에 도시된 바와 같다. 그림 9에서 보듯이 청계천 상·중·하류의 각 공구별로 수문곡선의 크기가 상이함을 알 수 있고 청계천은 본류 구간 이외에 세부 지류의 영향이 크다는 것을 또한 알 수 있다.

청계천 복원 이후 청계천이 평균 30~40 cm의 수심

을 유지하기 위해서는 평균 1.4 m³/s(≈120,000 m³/day)의 유지용수가 지속적으로 공급되어야 하는데 원활한 유지관리를 위해서는 향후 청계천 유역의 물을 최대한 이용하는 것이 중요하다. 현재의 물순환 상태에서 외부 유역으로부터의 별도 공급 없이 청계천 유역 자체의 물만으로 유지용수 공급이 가능한 기간을 그림 10의 유행곡선에서 살펴보면, 1공구 광교 지점(CG9)은 7.3일, 2공구 동대문 운동장 지점(CG5)은 18.3일, 3공구 정릉천 합류전 지점(CG1)은 54.8일간 계획 유지용수 이상이 흐르는 것으로 모의되었다. 이는 유역의 물순환이 청계천으로 이어지는 조건에서의 유출 모의 결과로, 홍수기를 제외하면 상류의 물이 청계천으로 이어지지 못하고 대

표 3. 공구별 유출 수문곡선 모의 지점

지점명	유역면적(km ²)	유로연장(km)	구분	비 고
CG9	5.39	3.18	1공구	청계천 상류의 1공구 광교 지점
CG5	12.97	5.35	2공구	청계천 중류의 2공구 동대문운동장 지점
CG1	28.92	8.15	3공구	성북천 합류 이후 정릉천 합류전 지점
제2마장교	49.27	12.04	.	제2마장교 수위관측소 지점

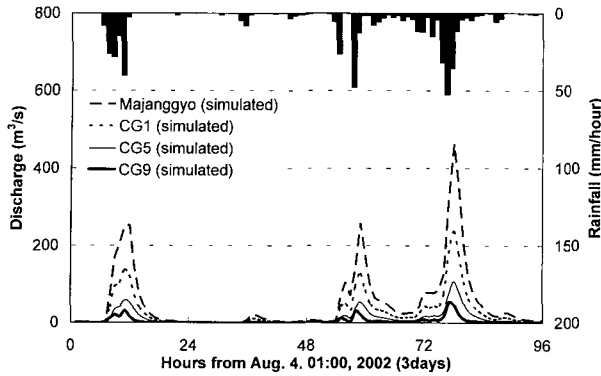


그림 9. 구간별 수문곡선 비교(2002.8.4~7)

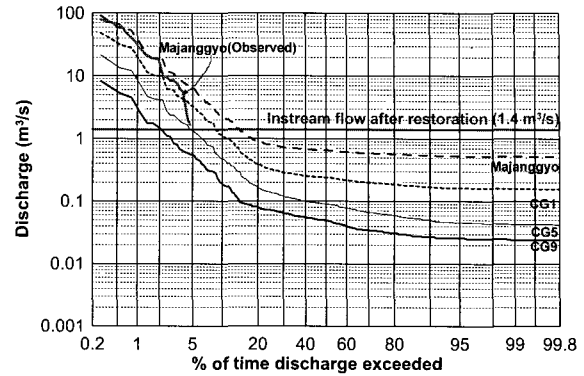


그림 10. 구간별 유황곡선 비교(2002)

부분 하수구로 흘러들어가고 있는 현재 조건에서의 갈수기 유황은 모의 결과보다 더 작게 나타날 것이다.

청계천 복원공사 이후 청계천에 일정 부분 이상 청계천 유역을 물이 흐르도록 하는 것은 유지관리 측면 뿐 아니라 도시하천 유역의 물순환 건전성을 회복하는 측면에서도 중요하다. 이를 위해서는 청계천 상류의 소하천이 청계천으로 이어지도록 하는 것과 침투시설, 저류지 등의 우수저류시설을 통해 지표면 유출을 감소시키고 유역 내 저류 능력을 향상시키는 등 다양한 방안이 고려되어야 한다. WEP 모형은 침투시설, 저류지 등이 물순환에 미치는 영향을 평가할 수 있도록 설계되었으며 일본의 여러 유역의 물순환 개선 연구에 적용된 사례가 있어(Jia 등, 2001), 향후 연구를 통해 청계천 유역에 대해서도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결 론

물리적 개념의 공간 분포형 강우-유출 모형인 WEP 모형을 청계천 유역에 적용하여 물순환 특성을 분석하였다.

모형의 적용 결과, 청계천 유역은 강우시의 지표면 유출량이 크고, 강우의 유출에 대한 반응이 빠른 전형적인 도시 유역의 특성을 나타내었으나 소유역별로는 불투수 면적비율 등의 차이에 따라 증발산, 지표면 유출 등이 서로 다른 양상을 나타내었다. 특히 북한산, 남산 등 산지와 경복궁, 창덕궁 등 고궁이 포함된 소유역은 불투수 면적비율이 적고 지표면 유출이 적어 도시의 녹지가 물순환에 적지않은 영향을 주고 있음을 알 수 있었다.

WEP 모형의 하천 유출 모의 결과를 홍수기시 관측값과 비교한 결과 1시간의 다소 긴 추적시간에도 양호한 결과를 나타내어 모형이 하천 유출 모의에 적절함을 확인하였으며, 청계천 복원공사 이전의 토지이용 및 하

도 조건에 대해 모의하여 각 지점별 유황곡선을 비교한 결과 현재의 물순환 상태에서는 복원후 유지용수를 공급하기 어려운 것으로 판단된다.

본 연구는 청계천 유역에 대한 WEP 모형의 초기 적용 결과를 분석한 것으로, 향후 물리적 매개변수의 공간분포에 대한 정밀한 자료구축이 필요하며, WEP 모형을 이용한 우수유출저감시설의 영향 모의 등 청계천 유역의 물순환 정상화 대안에 대한 연구가 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호 2-6-2)에 의해 수행되었습니다.

WEP 모형의 적용에 있어서 기술지원을 한 일본 토목연구소와 중국 수리수전과학연구소의 Jia 박사에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 과학기술부 (2004). 수자원의 지속적 확보기술개발사업-청계천 복원공사 모니터링 및 물순환 해석(과제번호 6-1-1). 한국건설기술연구원.
- 김윤영 (2004). “도심으로 유입되는 청계천 유역의 지하수계 특성.” 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제37권, 제1호, pp. 63-67.
- 서울특별시 (2003). 대학과 연계한 하천관리에 대한 연구(4차년도 보고서), 서울특별시.
- 환경부 (2004). 2003 상수도 통계. 환경부.
- Jia, Y. (2004). “3차원 유역 물순환 해석을 위한 WEP 모형의 적용.” 청계천 유역 물순환 해석 국제 심포지엄 자료집, 한국건설기술연구원, pp. 25-37.
- Kinouchi, T., and Jia, Y. (2003). “WEP Model의 개발

- 과 적용.” **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 48-58.
- 土木研究所 (2002). WEP 모델 解説書. 土木研究所, pp. 3-22.
- Delleur, J.W. (2003). “The Evolution of Urban Hydrology: Past, Present, and Future.” *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 129, No. 8, pp. 563-573.
- Jia, Y. (1997). *Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model*. Ph.D. dissertation, University of Tokyo, Japan.
- Jia, Y., Ni, G., Kawahara, Y., and Suetsugi, T. (2001). “Simulation of hydrological cycle in an urbanized watershed and effect evaluation of infiltration facilities with WEP MODEL.” *Journal of Hydroscience and Hydraulic Engineering*, Vol. 19, No. 1, pp. 43-52.
- Ni, G., Jia, Y., Kinouchi, T., Tojima, K., Yoshitani, J., Suetsugi, T., and Kawahara, Y. (2001). “Field observation and simulation of groundwater level changes due to urbanization in the Yata River basin, Japan.” *Proc. of a symposium held during the 6th IAHS Scientific Assembly at Maastricht, The Netherlands*, IAHS Publ. No. 269, pp. 139-142.
- (논문번호:05-10/접수:2005.01.13/심사완료:2005.06.30)