

# 청계천 유역에 대한 WEP 모형의 적용

## Application of WEP Model to the Cheonggecheon Watershed

노성진\*, 김현준\*\*, 정일문\*\*\*, 장철희\*\*\*\*, 김동필\*\*\*\*\*

Seong Jin Noh, Hyeon Jun Kim, Il Moon Cheong, Cheol Hee Jang

### 요 지

본 연구에서는 물순환의 재생이나 보전에 필수적인 유역 물순환의 정량화와 유역변화의 영향예측을 위해 개발된 WEP (Water and Energy Transfer Process) 모형의 국내 유역에 대한 적용성을 검토하고, 청계천 유역의 물순환 양상을 모의하였다. WEP 모형은 복잡한 토지이용이 이루어지고 있는 도시하천 유역에 대한 물순환의 정량화를 목적으로 일본의 토목연구소 (PWRI; Public Works Research Institute), 과학기술진흥사업단, Jia 박사 등에 의해 공동으로 개발되었으며 지표면 및 비포화 토양층의 물·열 플럭스 계산, 하도흐름의 추적계산 및 지하수 유동계산, 격자내 토지이용의 불균질성 반영 등이 가능한 물리적인 기반의 공간 분포형 모형 (Physically Based Spatially Distributed)이다. 모형을 적용한 청계천 유역 (유로연장 13.75 km, 유역면적 50.96 km<sup>2</sup>)은 전체 토지이용중 도시지역이 75.9%를 차지하고, 유역내 인구가 120만명에 이르는 도시 유역으로 높은 불투수 면적비율, 인공계 물순환 요소의 영향 등의 도시 유역 특성이 물순환의 구조 전반에 미치는 영향에 대한 연구가 부족하였다. WEP 모형 적용 결과, 모의 기간 동안의 하천 유출량은 실측치에 근사한 값을 나타내었으며 유역의 물순환 양상을 모의할 수 있었다. 청계천 유역은 전형적인 도시 유역의 특성을 보여주었는데, 강우시의 직접유출량이 크고, 강우의 유출에 대한 반응이 빠르며, 증발산의 경우는 산림지역보다 도시지역이 상대적으로 적은 것으로 분석되었다. 이번 연구를 통하여 WEP 모형이 유역 물순환 해석에 적절한 모형임을 확인할 수 있었으며, 향후 청계천 유역의 물리적 특성에 대한 매개변수와 인공계 물순환 자료의 보완을 통해 보다 향상된 모의가 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : WEP 모형, 도시 유역, 청계천 유역, 물순환 해석, 분포형 모형

### 1. 서론

도시화로 인한 물순환 환경의 변동을 파악하여, 치수, 이수 및 환경측면에서 건전한 도시 유역의 물순환 체계를 회복하기 위해서는 유역내 물순환계에 대한 정량적인 이해와 이를 위한 해석 모형이 필수적이다. 본 연구에서는 청계천 유역의 물순환 해석을 위한 모형으로 WEP (Water and Energy Transfer Process) 모형을 선정하여, 국내 유역에 대한 적용성을 검토하고, 청계천 유역의 물순환 양상을 모의하였다. WEP 모형은 유역 물순환의 정량화와 유역변화의 영향예측을 위해 개발된 모형으로 일본 동경의 물·열순환 해석에 적용되었으며(Jia, 1997), 일본과 중국의 여러 유역의 유역단위 물순환 해석에 이용되었다 (Jia 2004; Jia 등, 2001). 국내에서는 2003년 소개된 이후 (Kinouchi와 Jia, 2003), 일부 유역의 물순환 해석에 적용되었다 (김현준 등, 2004).

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [sjnoh@kict.re.kr](mailto:sjnoh@kict.re.kr)  
\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : [hjkim@kict.re.kr](mailto:hjkim@kict.re.kr)  
\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 선임연구원 · E-mail : [imchung@kict.re.kr](mailto:imchung@kict.re.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [chjang@kict.re.kr](mailto:chjang@kict.re.kr)  
\*\*\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 수자원연구부 연구원 · E-mail : [dpkim@kict.re.kr](mailto:dpkim@kict.re.kr)

## 2. 모형의 개요

WEP 모형은 일본의 토목연구소, 과학기술진흥사업단, Jia 등이 공동으로 개발한 물리적인 기반의 공간 분포형 모형 (Physically Based Spatially Distributed)이다. WEP 모형은 격자 기반 모형으로 유역을 평면 격자로 분할하여 각각의 격자를 계산단위로 하며, 연직방향으로 표층, 과도층, 지하대수층으로 나누어진다. 수평방향으로 표면류와 하도류는 각각 1차원 운동과 기법으로 추적되고 지하수 흐름은 각 층간의 함양, 침투, 양수량 등을 고려하여 2차원 해석을 하며, 이때 지표면, 하도와와의 물 교환을 고려한다. 토지이용은 크게 수역, 나지-식생역, 불투수역 등의 세가지로 분류되며, 각 요소별로 다시 세부 분할된다. 증발산은 식생 등의 차단을 고려하여 Penman 식으로 계산되며, 침투는 Green-Ampt 모형을 다층 토양에 대해서 적용 가능하도록 수정한 “Generalized Green-Ampt 모형”을 이용하여 계산한다 (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 km<sup>2</sup>의 도시하천이다. 지천으로 성북천과 정릉천을 포함하고 있으며, 하상경사는 1/310~1/510 정도이다. 토양은 사질토 1.0%, 암석 4.0%, 미사질양토 25.3%, 미사질식양토 33.0%, 식양질토 35.9%, 식토 0.9%로 대부분이 양토 (loam)로 이루어져 있으며, 토지이용은 산림지역이 23.2%, 도시지역이 75.9%를 차지하고 있다. 유역내 행정구역은 강북구, 동대문구, 성동구, 성북구, 종로구, 중구의 총 6개구 86개동이고 유역내 인구는 120만명에 달한다 (서울특별시, 2003). 유역내 수위 관측소는 청계천과 정릉천 하류부인 제2마장교와 용두교에 1999년에 각각 설치되어 운영되고 있다.

### 3.2 입력자료 구축

WEP 모형의 입력 자료를 그 특성에 따라 크게 분류하면 대상유역 (유역분할, 인구분포 등), 기상조건, 지표면 조건, 표층토양, 하천, 지하 대수층, 인공계 용수, 인공계 열수지, 초기·경계 조건으로 나눌 수 있다. 기존의 구축된 자료를 바탕으로 GIS 프로그램을 이용, 청계천 유역을 200 m × 200 m의 격자로 나누고 (남북방향 54개, 동서방향 54개), 유역을 8개의 소유역으로 분할하였으며 하천은 소유역마다 1개씩 구분하고 하천의 물리적 특성 (경사, 단면 등)이나 모의결과 비교지점 등을 고려하여 26개로 세부 분할하였다 (그림 1(a)). 수치고도 자료를 이용하여 각 격자의 지표면 표고와 경사를 결정하고 이로부터 유하방향 (그림 1(b)) 을 계산하였다. 그림 1(c)의 토지이용은 격자크기 25m의 자료를 이용하여 한 격자 (200m × 200m) 내에 64개의 세부 토지이용 정보가 들어가도록 하였으며 (모자이크 법), 그림 1(d)의 인구분포 자료는 각 구청의 인구통계를 이용하여 구축하였다. 기상 조건은 기상청 서울 측후소의 자료를 이용하였다.

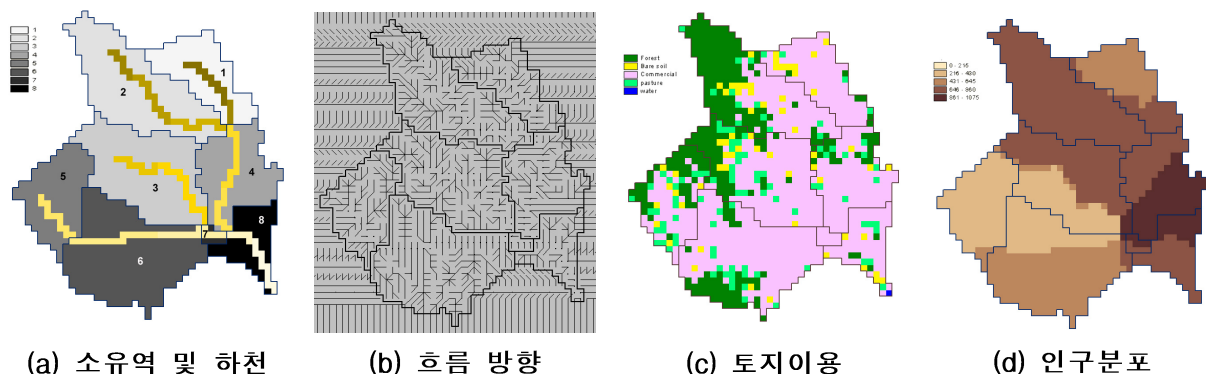


그림 1. 청계천 유역에 대한 WEP 모형의 입력자료 분포도

### 3.3 모형의 적용

#### 3.3.1 모의 조건

표층 토양의 초기함수율과 초기 지하수위 등 초기 계산 시작 조건의 영향을 줄이기 위해 1998년부터 2000년까지의 기간을 모의한 후 2000년 12월 31일 24:00의 조건을 초기조건으로 사용하였다. 실제 모의 기간은 2001년 1월 1일 01:00에서 2002년 12월 31일 24:00까지 2년간이며 2001년의 자료는 모형을 보정에 2002년의 자료는 검증에 각각 사용하였다. 모의시 시간간격은 1시간으로 하였으며, PC (Pentium 4, 2.8 Ghz, 512M RAM)에서 2년을 모의하는데 30분 정도가 소요되었다.

#### 3.3.2 유출 모의 결과

모의된 하천 유출 결과 중 제2마장교와 용두교 지점에 대한 강우시의 수문곡선을 관측값과 비교하여 그림 2에 나타내었다. 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 나타내었으나, 고수부에서는 모의결과가 실측치보다 약간 크게 나타나고 저수부에서는 실측값이 모의결과보다 더 크게 나타났다. 이는 WEP 모형의 입력자료에 복잡한 도시유역의 유출 특성에 대한 정보가 반영되지 못했기 때문으로 보이며 향후 연구를 통해 결과를 개선해 나가야 할 부분이다. 그림 3에서 결정계수 ( $R^2$ )는 제2마장교 지점에서 보정기간인 2001년과 검증기간인 2002년에 각각 0.839, 0.692로 비교적 높았으나, 용두교 지점에서는 각각 0.605, 0.281로 낮게 나타났으며 향후 연구시 각각의 지류에서의 흐름에 대한 보다 세심한 보정이 필요한 것으로 판단된다.

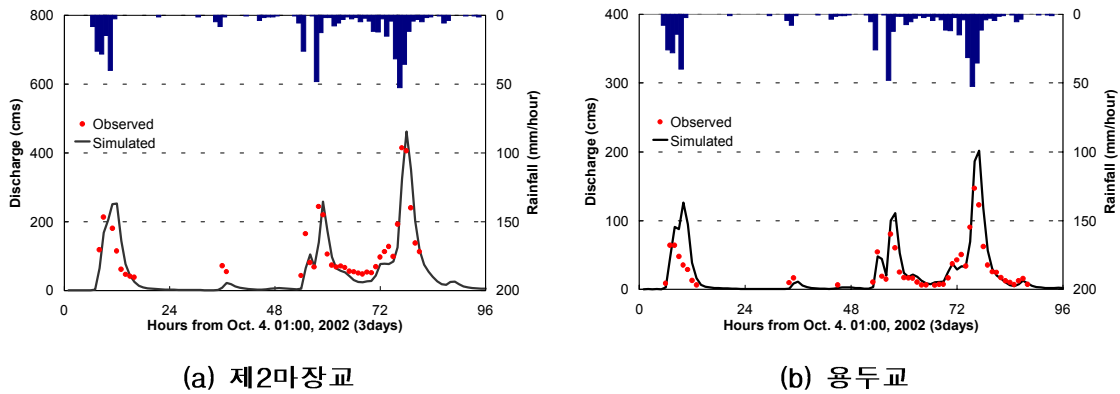


그림 2. 관측치와 모의결과의 수문곡선 비교

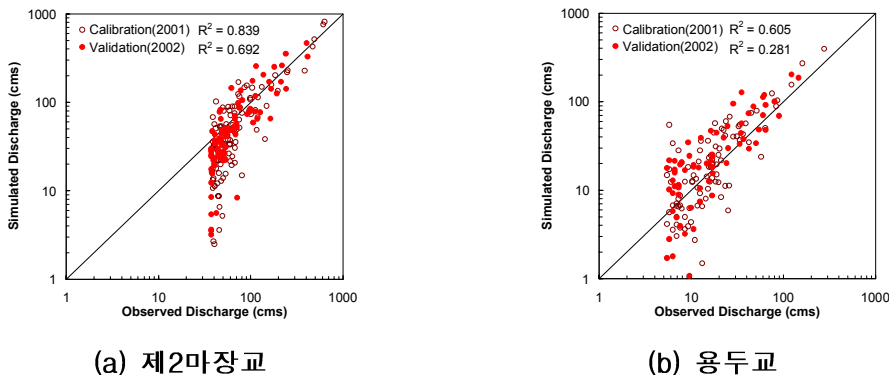


그림 3. 관측 유량과 모의 유량의 비교

### 3.3.3 물순환 모의 결과

모의된 2002년 청계천 유역의 연간 물수지는 다음의 그림 4와 같다. 연간 1388 mm의 강우에 대하여 832 mm의 직접 유출이 발생하고 385 mm가 침투되며 398 mm (불투수층: 146 mm, 투수층: 26.9 mm, 표층토양: 225 mm)가 증발산에 의해 대기중으로 방출되었다. 하천유출량은 1205 mm로 이중 직접유출, 중간유출, 지하수유출의 비율은 각각 69%, 12.5%, 18.3%이다. 표 1에서 소유역별 물수지는 증발산, 직접유출 등이 서로 다른 양상을 나타내었으며, 이는 불투수 면적비율 등과 관련있는 것으로 판단된다. 2002년 격자별 증발산과 직접유출의 연간 누가량의 공간분포는 그림 5, 6와 같다. 격자별 연간 증발산량은 산림 및 녹지가 많고 불투수율이 적은 지역이 도시화된 지역보다 상대적으로 높았으며, 최소·최대값은 각각 246 mm, 997 mm이었다. 연간 직접유출량은 증발산량과는 반대의 결과를 보였는데, 도시지역에서는 대부분 800 mm이상의 직접유출을 나타내었으며 격자별 최소·최대값은 각각 157 mm, 1202 mm였다.

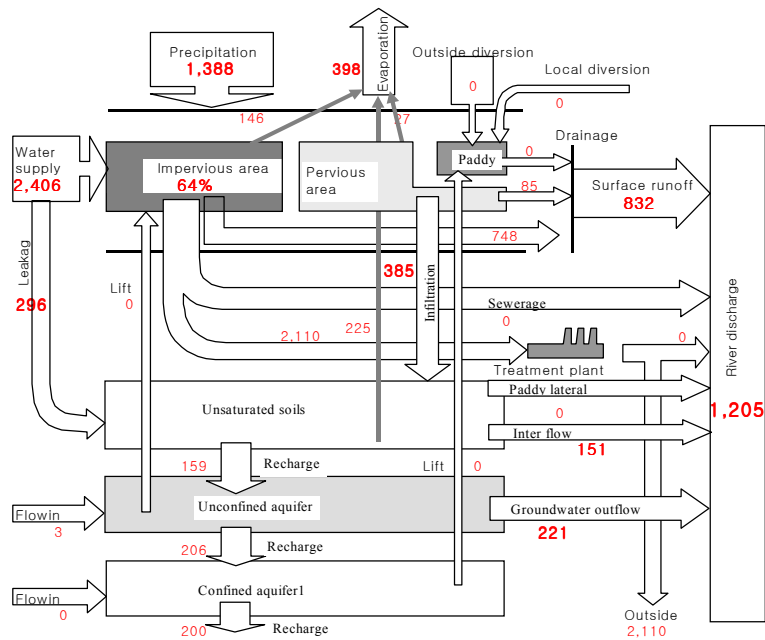


그림 4. 청계천 유역 전체의 물수지 (2002)

표 1. 소유역별 연간 물수지 (2002)

구 분	전체	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	0.642	0.825	0.406	0.650	0.749	0.481	0.719	0.939	0.841
강수량 (mm)	1388.0	1388.0	1388.0	1388.0	1388.0	1388.0	1388.0	1388.0	1388.0
증발산 (mm)	397.7	301.9	519.6	309.4	355.6	468.5	360.7	250.9	328.1
직접 유출 (mm)	832.7	998.8	640.0	822.6	950.0	645.9	891.4	1096.8	1038.3
침투 (mm)	384.6	193.6	616.4	395.6	243.1	598.2	313.8	77.3	145.1
중간 유출 (mm)	151.0	80.6	98.3	183.5	232.2	185.9	131.7	0.0	197.1
지하수 유출 (mm)	221.4	133.6	202.6	83.0	999.2	103.6	40.8	444.8	172.2
하천 유출 (mm)	1205.1	1212.9	940.9	1089.1	2181.4	935.3	1063.9	1541.5	1407.7
상수도 이용 (mm)	2406.2	2482.5	2765.7	2187.8	3536.0	1215.8	1881.7	3505.0	3420.6
상수도 누수 (mm)	296.0	305.4	340.2	269.1	434.9	149.5	231.4	431.4	420.7

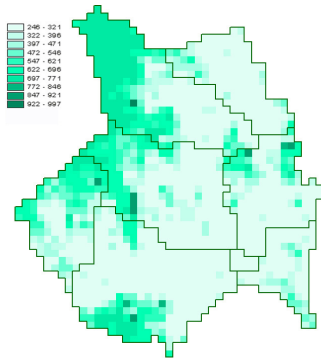


그림 5. 연간 증발산량의 공간분포 (2002)

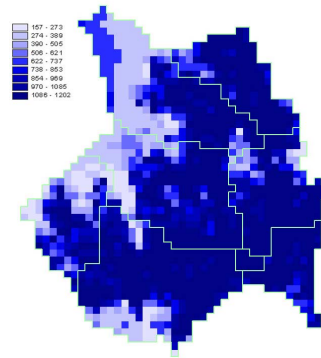


그림 6. 연간 직접 유출량의 공간분포 (2002)

#### 4. 결론

물리적인 기반의 공간 분포형 모형인 WEP 모형을 청계천 유역에 대해 적용하여 물순환 해석의 적용성을 검토하였다. 모형의 적용 결과, 청계천 유역은 전형적인 도시 유역의 특성을 보여주었는데, 강우시의 직접유출량이 크고, 강우의 유출에 대한 반응이 빠르며, 증발산의 경우는 산림지역보다 도시지역이 상대적으로 적은 것으로 분석되었다. 소유역별 물수지는 증발산, 직접유출 등이 서로 다른 양상을 나타내었으며, 이는 불투수 면적비율 등과 관련있는 것으로 판단되었다. 본 논문은 모형의 초기 적용 결과를 분석한 것으로 향후 청계천 유역의 토양, 지하수, 식생 등 물리적 특성에 관련된 매개변수 자료와 지하수 이용량 등 인공계 물순환에 대한 자료를 보완하여 모형의 적용성을 보다 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원 (과제번호 6-1-1)에 의해 수행되었습니다. 연구비 지원에 심심한 감사의 뜻을 표합니다.

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

#### 참고문헌

- 김현준, 장철희, 노성진, 김동필, 정일문, 홍일표 (2004). "청계천 유역의 수문 모니터링 및 물순환 해석." 청계천 유역 물순환 해석 국제 심포지엄 자료집, 한국건설기술연구원, pp. 3-22.
- 서울특별시 (2003). 대학과 연계한 하천관리에 대한 연구(4차년도 보고서), 서울특별시.
- 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 개발과 적용." 한국수자원학회지, 한국수자원학회, 제36권, 제5호, pp. 48-58.
- Jia, Y. (2003). WEP Model의 개발과 적용.
- Jia, Y. (1997). *Integrated analysis of water and heat balances in Tokyo metropolis with a distributed model*. Ph. D., dissertation, University of Tokyo, Japan.
- 土木研究所 (2002). WEP 모델 解説書. 土木研究所, pp. 3-22.
- 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 Hydrosience and Hydraulic Engineering*, Vol. 19, No.1, pp. 43-52.