

WEP 모형을 이용한 도림천 유역 물순환 모의 Water Cycle Simulation for the Dorimcheon Catchment Using WEP Model

이 승 종* / 김 영 오** / 이 상 호*** / 이 길 성****

Lee, Seung Jong / Kim, Young-Oh / Lee, Sang Ho / Lee, Kil Seong

Abstract

In this study, a WEP (Water and Energy transfer Processes) model was used to simulate the water cycle of the Dorimcheon catchment which suffers from the distorted water cycle as a typical urban catchment. Two different land uses in the past (i.e. 1975) and at present (i.e. 2000) were incorporated into the simulation to investigate the runoff characteristics resulting from the increase of the impervious ratio due to urbanization. The simulation results show that the concentration time is decreased and the peak discharge and the total runoff are increased by urbanization while the infiltration and baseflow are reduced. In addition, the effects of infiltration trenches and permeable pavements were also simulated to search for alternatives that can restore the distorted water cycle. The simulation results prove that the installation of both alternatives can restore the runoff characteristics to that prior to urbanization.

keywords : Dorimcheon catchment, water cycle, WEP (Water and Energy transfer Processes) model, infiltration trench, permeable pavement

요 지

본 연구에서는 전형적인 도시하천으로 왜곡된 물순환을 보이는 도림천 유역에 대해서 WEP(Water and Energy transfer Processes) 모형을 이용하여 물순환 모의를 수행하였다. 과거(1975년)와 현재(2000년)의 토지이용도를 이용한 모의를 통해 도시화에 의한 불투수율 증가가 유출특성에 미치는 영향을 분석하였으며, 모의결과 도시의 개발로 인해 과거보다 첨두 도달시간은 감소하고, 첨두 및 총유출량이 증가한 것으로 나타났으며, 침투량과 기저유출량이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한 왜곡된 물순환을 회복하기 위한 대안으로 침투트렌치와 투수성 포장재의 설치 효과에 대한 모의를 수행하였으며, 모의결과 두 가지 대안을 함께 적용했을 경우에 도시개발 이전의 유출특성에 근접하는 것을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 도림천 유역, 물순환, WEP(Water and Energy transfer Processes) 모형, 침투트렌치, 투수성 포장재

-
- * 서울대학교 공학연구소 연구원
Research Assistant, Engineering Research Institute, Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: bunker2@snu.ac.kr)
 - ** 교신저자, 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수
Assistant Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: yokim05@snu.ac.kr)
 - *** 부경대학교 건설공학부 부교수
Associate Professor, Division of Construction Engrg., Pukyong National Univ., Pusan, Korea
(e-mail: peterlee@pknu.ac.kr)
 - **** 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수
Professor, School of Civil, Urban & Geosystem Engrg., Seoul National Univ., Seoul, Korea
(e-mail: kilselee@snu.ac.kr)

1. 서론

공업중심의 사회구조의 발달은 급격한 도시화의 진행을 가져오게 하였고, 도시의 발달로 인한 불투수면의 증가는 물순환에 영향을 미쳐 홍수 지체시간 감소, 침투 및 총유출량 증가, 침투능 및 증발산량 감소 등의 변화를 가져오게 하였다. 이로 인해 홍수기에 빈번한 침수피해가 발생하게 되었으며, 침투량이 감소함에 따라 지하수의 함양이 낮아지게 되어 갈수기에는 하천의 건천화 현상을 가져오게 하였다. 따라서, 도시화로 인해 발생하는 피해를 최소화 시키고, 도시하천의 유출특성을 도시개발 이전의 유출양상을 유지할 수 있도록 하기 위해 홍수방어 기능과 기저유출 확보기능을 가지는 우수유출 저감시설물 및 침투증진시설의 적극적인 설치가 제안되어왔다(연세대학교, 2000).

우수유출 저감시설물과 침투증진시설의 설치에 의한 효과는 국내외적으로 여러 연구사례를 통해 확인할 수 있다. Satoshi(1995)는 road research laboratory method를 이용하여 투수성 포장재와 침투파이프의 설치에 의한 우수조절 연구를 수행하였으며, Eric et al.(1999)은 덴마크 코펜하겐의 도시 중심가의 공원부지에 침투증진시설 중 하나인 침투트랜치를 설치한 후 수문학적 거동에 대해 연구하였다. Jia et al.(2001)은 2035년도에 5.7 km²의 도시개발이 계획되어있는 일본 Chiba현의 해노천 유역에 WEP (Water and Energy transfer Processes) 모형을 구축한 후 1993년(현재)과, 2035년(미래), 그리고 침투트랜치를 적용한 2035년(미래)의 물수지를 비교하였다. 비교결과 침투트랜치 설치에 의해 도시개발 후에도 개발전의 유출양상을 유지하는 것을 확인하였다. 연세대학교(2000)에서는 시범유역에 우수유출 저감시설을 직접 설치하고, ILLUDAS(ILLinois Urban Drainage Area Simulator) 모형을 이용하여 실제강우와 설계강우에 대한 저감효과를 모의하였다. 또한 심재현 등(2004)은 시범유역에 침투통을 설치하여 실시간으로 현장계측을 수행하고 저감효과를 정량적으로 분석하였으며, 이를 이용하여 실제 강우사상에 대하여 용인시의 택지개발지구를 대상유역으로 침투통 유출 저감효과를 PCSWMM(PC Storm Water Management Model)으로 모의하였다. 모의결과 침투통 설치로 인해 15%~23%의 유출저감율과 3~25%의 침투유출 저감효과를 확인하였다.

본 연구에서는 급격한 도시화로 인해 왜곡된 물순환 현상을 나타내는 도립천 유역에 대해 침투증진시설의 설치모의가 가능한 WEP 모형을 구축한 후 침투트랜치와 투수성 포장재설치의 가상모의를 수행하였으며, 가

상모의 결과를 과거 1975년의 토지이용도를 이용하여 수행한 모의결과와 비교하여 이들 대안들의 설치효과를 분석하였다.

2. WEP 모형

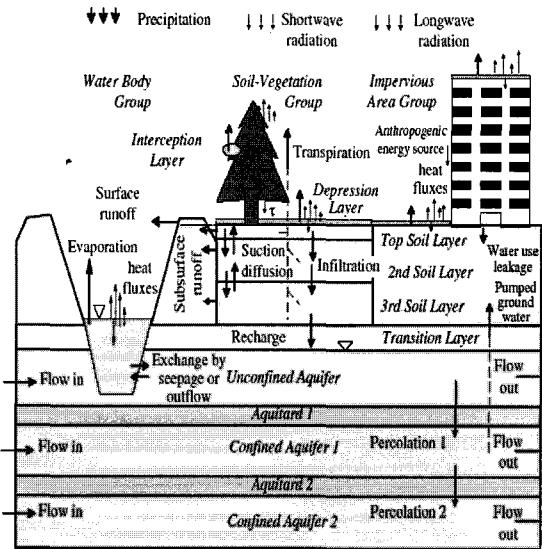
2.1 모형의 개요

WEP 모형은 복잡한 토지이용이 이루어지고 있는 도시하천 유역에 대한 물순환의 정량화를 목적으로 1997년 개발되었으며, 다양한 물순환 과정을 물리식으로 직접 표현하는 물리적인 기반의 공간분포형(physically based spatially distributed) 모형이다. 침투, 증발산, 지표면 및 지하수 유출, 지하수 유동 등의 자연계는 물론 인간활동에 따른 인공계 물의 흐름에 대한 시공간 분포를 격자단위에서 모의할 수 있으며, 특히 모자이크법을 사용하여 격자 내 토지이용의 불균질성과 침투시설 및 저류 조절지 등의 효과를 모의할 수 있다(土木研究所, 2002). 모형개발 이후 Jia(1997)에 의해 일본 동경의 물과 열순환 해석에 적용되었으며, 최근에는 중국 후룡강 유역의 물순환 해석에도 이용되었다(Jia et al., 2004). 국내에서는 노성진 등(2004)에 의해서 도시하천인 청계천 유역의 물순환 해석 및 도시지역의 불투수율 변화에 의한 유출특성 분석에 적용되었다.

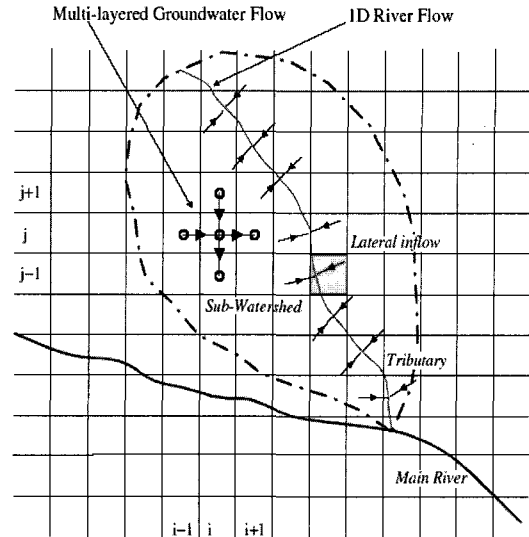
2.2 모형의 구조

다음의 내용은 WEP 해설서(土木研究所, 2002)를 참조하여 서술하였으며, 모형에 대한 자세한 설명은 Jia(1997)의 박사논문이나 WEP 해설서(土木研究所, 2002) 등에 구체적으로 설명되어 있다.

WEP 모형은 격자기반 모형으로 대상유역을 평면격자로 분할하여 각 격자를 계산단위로 사용한다. 한 개의 계산격자 내에서 취급되는 물과 열의 수송과정의 수직구조는 그림 1(a)와 같으며 연직방향으로 표층, 과도층, 지하대수층(비피압대수층, 피압대수층1, 피압대수층2)으로 나누어진다. 모형의 평면구조는 그림 1(b)와 같으며 표면류와 하도류의 추적계산은 1차원 운동파(kinematic wave) 방법을 이용한다. 지하수 흐름의 해석에서는 지표면과 하도의 물교환 및 각 대수층간의 수직 물교환(함양, 침투, 양수)을 고려하여 2차원 해석을 한다. 증발은 Penman 방정식을 이용하고 증발산은 Penman-Monteith 방법을 이용하여 계산한다. 침투는 Green-Ampt 모형을 수정하여 다층 토양에 대해서 적용할 수 있는 generalized Green-Ampt 모형을 이용하여 계산한다.



(a) WEP 모형의 수직구조



(b) WEP 모형의 수평구조

그림 1. WEP 모형의 구조(Jia et al., 2001)

WEP 모형은 침투트렌치의 설치에 대한 정량적인 모의를 할 수 있으며, 침투트렌치의 침투량을 다음 식 (1)~식 (4)를 이용하여 계산한다.

$$\frac{\partial S_t}{\partial t} = Q_{in} - Q_{inf} - Q_{ovf} \quad (1)$$

$$S_t = nLWH \quad (2)$$

$$Q_{inf} = K_0L(aH+b) \quad (3)$$

$$Q_{ovf} = cL(H - H_m)^{3/2} \quad (4)$$

여기에서 S_t 는 저류량, Q_{in} 은 유입량, Q_{inf} 는 침투량, Q_{ovf} 는 월류량, n 은 공극률, L 은 길이, W 는 폭, H 는 수심, H_m 은 계획수심, K_0 은 트렌치 바로 아래 토양의 포화투수계수, 그리고 a , b , c 는 상수이다.

3. 도림천 유역의 물순환 모의

3.1 도림천 유역현황

도림천은 관악산의 북사면인 관악구 신림동에서 발원하여 북서쪽으로 유로가 형성되어 도심지를 통과하는 하천이다. 지류로는 봉천천과 대방천이 있으며, 영등포구 문래동 5가에서 안양천과 합류한다. 도림천 유

역의 위치는 동경 126° 35'~126° 58', 북위 37° 25'~37° 30'에 해당하는 지역이며, 서울시 구로구, 금천구, 영등포구, 동작구, 관악구 등 5개의 행정구역으로 구성되는 유역면적 40.96 km², 유로연장 14.20 km, 유역평균폭 2.95 km의 배수구역이다. 유역의 형상은 수지상을 이루고 있으며 본류인 도림천은 전구간 개수가 완료되었으며, 하폭은 21 m에서 134 m, 하상경사는 1/88~1/1,163, 하상구성 재료는 불용토를 포함한 실트질 모래 및 자갈모래 층으로 구성되어 있다(동일기술공사, 2002).

3.2 입력자료 구축

WEP 모형의 입력자료는 크게 대상유역, 기상조건, 지표면 조건, 표층토양, 하천, 지하대수층, 인공계 용수, 초기·경계조건 등으로 나눌 수 있다(土木研究所, 2002). 본 연구에서는 국토지리정보원에서 제작한 1:25,000 수치자료를 바탕으로 GIS 프로그램인 ArcView를 이용하여 입력자료를 구축하였다. 격자의 크기는 가로, 세로 100 m의 정사각형 격자로 설정하여, 남북방향 87개와 동서방향 84개의 총 7,318개의 격자로 계산영역을 구성하였는데 이 중 도림천 유역 내에 속한 격자는 4,090개이다. 유역은 그림 2(a)와 같이 총 8개의 소유역으로 분할하였으며, 인구자료는 통계지리정보 홈페이지(www.nso.go.kr)에서 2000년도의 각 동별 인구현황자료를 각 동에 포함되는 격자의 수로 나누어 그림 2(b)와 같이 동단위로 균일하게 분포시켰다. WEP 모형의 기상자료는 강우, 풍속, 일조시간, 기온, 상대습도 등의 시자료가

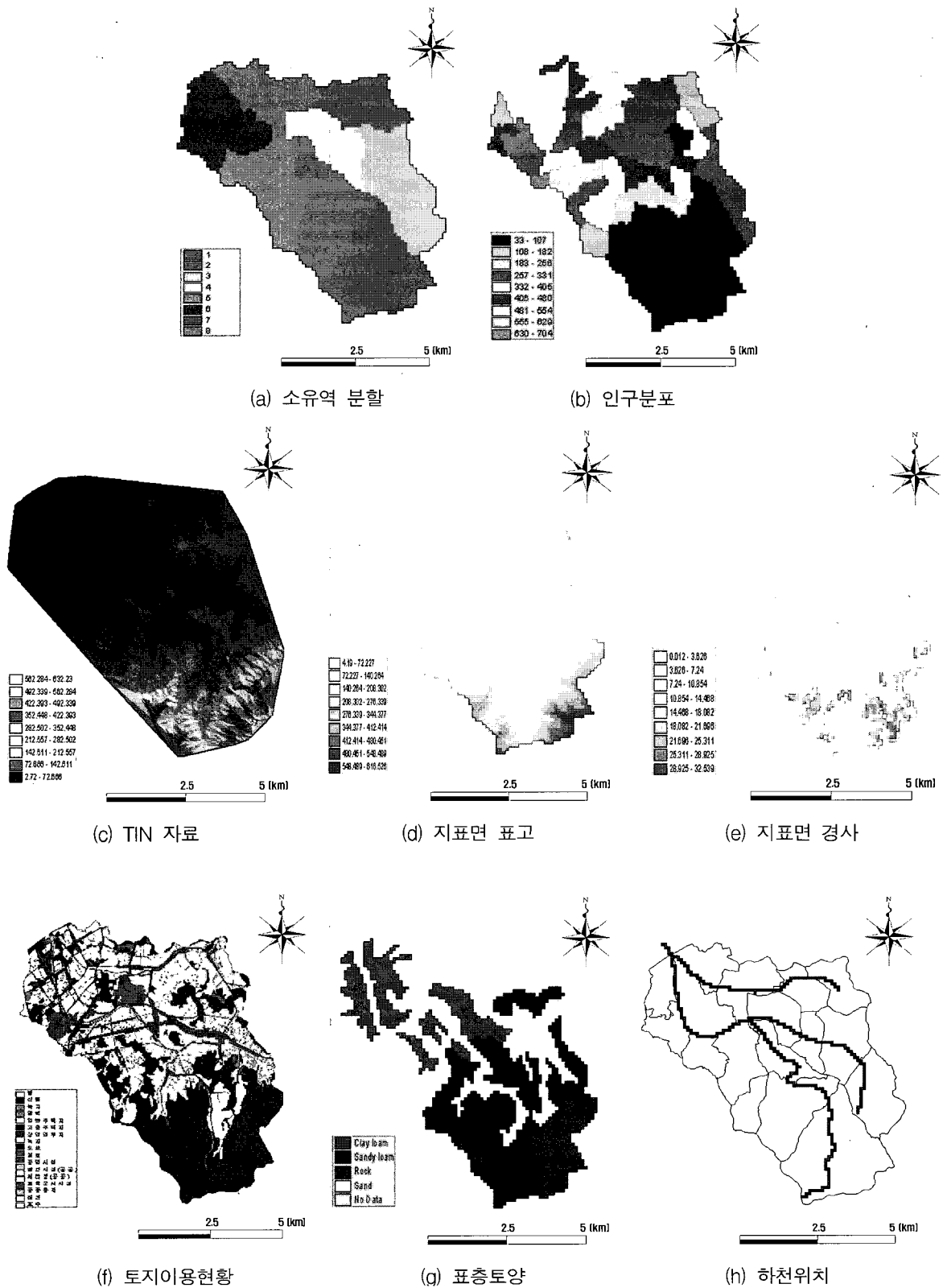


그림 2. 도림천 유역의 입력자료 구축결과

필요하다. 따라서 기상청이 관할하는 서울 측후소의 자료를 이용하여 기상조건을 구축하였다. 지표면 표고와 경사는 수치지도 중 고도자료를 그림 2(c)와 같이 TIN

자료로 변환한 후에 그림 2(d) 및 그림 2(e)와 같이 구축하였으며, 도시지역의 복잡한 토지이용 현황을 세밀히 고려하기 위해 2000년도 토지이용도를 그림 2(f)

와 같이 격자크기 25 m × 25 m로 생성하여 모형의 계산격자(100 m × 100 m) 내에 16개의 세부 토지이용 정보가 들어가도록 하였다. 표층토양의 공간분포는 독립천 하천정비 기본계획(동일기술공사, 2002)의 토양도를 이용하여 그림 2(g)와 같이 생성하였다. 하도의 위치는 수치지도를 이용하여 그림 2(h)와 같이 구축하였으며, 하도제원 및 하상계로는 독립천 하천정비 기본계획(동일기술공사, 2002)을 참조하였다. 지하대수층 입력자료 중 대수층 두께는 국가지하수정보센터(www.gims.go.kr)에서 있는 시추자료를 참조하였으며, 대수층 투수계수와 저류계수는 각각 김윤영(2000)의 박사학위 논문과 Freeze et al.(1979)이 제안한 값의 범위 내에서 결정하였다. 인공계 용수 중 상수도 이용량과 누수율은 상수도 통계연보(2002) 중 서울시에 대한 내용을 사용하였고, 공장용수량과 간이수도의 지하수 이용량은 고려하지 않았다. 초기조건의 영향을 줄이기 위해서 2000년 1월 1일부터 1년간을 warm-up 기간으로 모의한 후 2000년 12월 31일 24시의 조건을 초기조건으로 사용하였고, 경계조건은 자료가 미비하여 모형의 선택사항에서 적용하지 않았다.

3.3 모형의 보정(calibration) 및 검증(verification)

3.3.1 자료의 선택

독립천 유역의 관측자료는 안양천 치수대책 보고서(삼안기술공사, 1983)에 수록된 1982년의 수위자료와 서울대학교에서 직접 유량을 측정된 2004년도 갈수기 유량자료 몇 개가 전부이다. Sorooshian et al.(1983)은 일반적으로 통계적인 관점에서 볼 때, n 개의 매개변수를 추정할 경우에는 적어도 $20n$ 개의 유량자료가 필요하다고 제시하였다. 따라서, 본 연구에서는 자료의 수가 너무 적어서 관측자료를 모형의 보정 및 검증에 사용하기에는 무리가 있다고 판단되어 기존에 독립천 유역에 다른 수문모형을 이용하여 생성한 모의자료를 이용하기로 결정하였다.

본 연구의 대상유역인 독립천 유역은 도시하천으로서 그림 3과 같이 유역 내에 복잡한 관망을 구성하고 있다. WEP 모형은 분포형 모형으로 복잡한 토지이용이 이루어지고 있는 도시하천 유역에 대한 물순환의 정량화를 목적으로 개발되었으나, 관망모의는 수행할 수 없다.

안양천 유역의 물순환 건전화 기술적용 보고서(서울대학교, 2004)에는 하수관망 모의가 가능한 SWMM을 이용하여 1:500 GIS 하수관망도를 바탕으로 정밀하게 하수관망을 구성한 후 독립천 유역에 대해서 2000년 1월부터 2003년 12월까지 총 4년간의 연속모의를 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 자료수가 적어 통계적으로

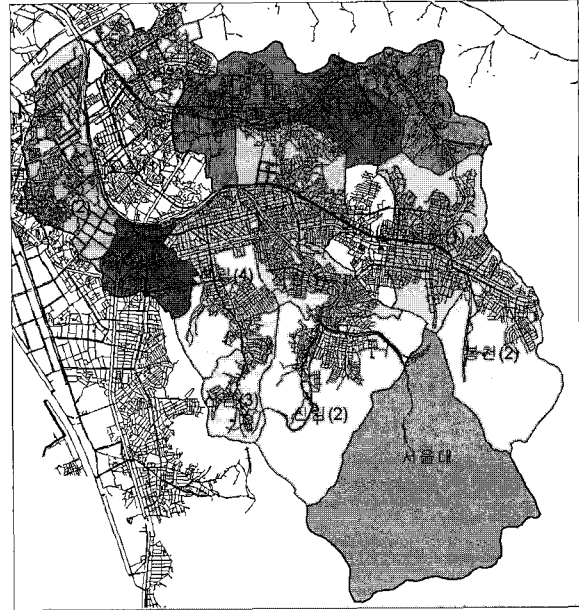


그림 3. 독립천 유역의 하수관망도
(서울대학교, 2004)

유의한 결과값을 얻을 수 없는 관측값 대신 하수관망을 구성하여 독립천 유역에 대하여 정밀하게 모의를 수행한 SWMM의 2001년에서 2003년간의 모의자료를 참값으로 가정하여 모형의 보정 및 검증을 수행하였다. 즉 정밀한 모의를 수행한 SWMM의 적용결과와 동일한 조건에서 최대 유사한 모의결과를 생성하도록 WEP 모형을 보정한 후, SWMM에서는 수행할 수 없는 몇 가지 효과분석을 WEP 모형을 통해 4절에서 서술하는 바와 같이 수행하였다.

3.3.2 보정 및 검증방법

Jia et al.(2004)에 의하면 WEP 모형에는 표층토양(surface soil), 하상(channel), 대수층(aquifer) 등 3개의 포화 투수계수(saturated hydraulic conductivity), 도시지역의 불투수 면적비율(impervious ratio of urban area), 지표면 웅덩이의 최대 저류량(maximum storage of land surface depression), Manning 계수(Manning coefficient), 그리고 저류계수(storage coefficient) 등의 7개의 핵심 매개변수가 있다고 하였으며, 핵심 매개변수를 제외한 나머지 매개변수들은 통상 보정없이 바로 추정된 값을 적용할 수 있다고 하였다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 선행연구를 바탕으로 포화 투수계수 2개(표층토양, 대수층), 도시지역의 불투수 면적비율, 하상의 Manning 계수, 그리고 저류계수 등 5개의 매개변수에 대해서 독립천 유역을 대상으로 민감도 분석을 수행하였으며, 민감도 분석결과를 바탕으로 표층토양 투수계수, 저류계수, 그리고 도시지역의 불투수 면적비율의

3가지 매개변수들을 수정해가며 모형의 보정 및 검증을 수행하였다.

WEP 모형의 기상조건으로 사용한 서울 측후소의 강수량자료를 분석한 결과 2001년과 2002년의 강수량은 각각 1386 mm와 1388 mm로 과거 30년(1971년~2000년)의 평균 강수량 1344 mm와 비슷한 것을 알 수 있었다. 하지만 2003년도의 강수량은 2011 mm로 과거 30년 자료에서 3번째로 많은 양으로 분석되었다. 또한 SWMM의 모의유량을 분석한 결과 연총유량의 경우도 2003년의 유량이 앞의 2년보다 약 200 mm 이상 큰 것을 알 수 있었다. 본 연구에서는 총 3년 기간 중 과거 30년의 평균 강수량과 비슷하게 내린 2001년도와 평년보다 많이 내린 2003년의 자료를 각각 보정자료로 선택하여 매개변수를 추정하고 나머지 2년의 자료로 모의 정확성을 검증하였다. 이와 더불어 위의 결과로 추정된 매개변수들의 평균을 이용하여 추가적으로 검증하는 방법을 수행하였다. 보정 및 검증기준으로는 식 (5)와 같이 Nash & Sutcliffe(1970)가 제안한 효율성 기준(efficiency criteria)을 선택하였으며, 3가지 중 가장 좋은 결과를 나타내는 방법에 의해 추정된 매개변수를 이용하여 도림천 유역의 물순환 모의를 수행하였다.

$$ME = 1 - \frac{F}{F_0} \quad (5)$$

$$F_0 = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_t^{SWMM} - \overline{Q^{SWMM}})^2 \quad (5a)$$

$$F = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Q_t^{SWMM} - Q_t^{WEP})^2 \quad (5b)$$

여기에서 ME 는 모형의 효율성을 나타내는 무차원 값,

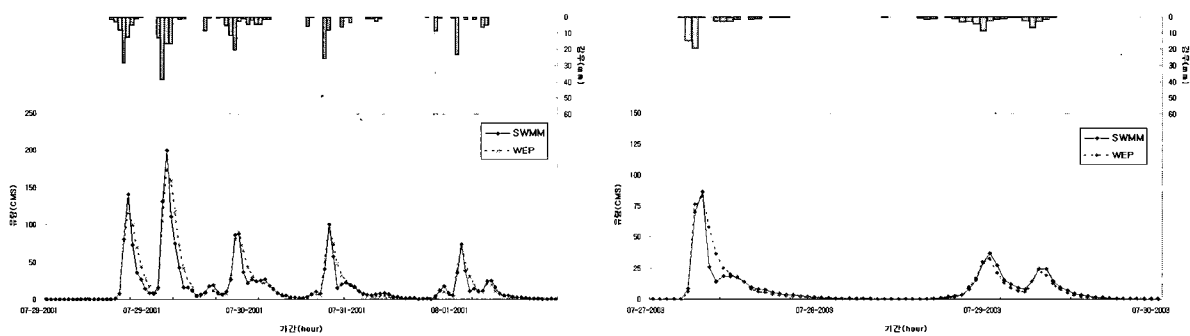
F_0 는 SWMM 모의유량의 분산, F 는 SWMM과 WEP 모형의 모의유량의 MSE(Mean Square Error), Q_t^{SWMM} 와 Q_t^{WEP} 는 각각 시간 t 에 있어서의 SWMM과 WEP 모형의 모의유량, 그리고 $\overline{Q^{SWMM}}$ 은 SWMM 모의유량의 평균값을 의미한다.

3.3.3 보정 및 검증결과

모형의 보정 및 검증을 수행한 결과 3가지 경우 중에서 가장 좋은 결과를 나타낸 2001년을 보정자료로 사용한 경우를 선택하였으며, 이때의 ME 값은 보정기간인 2001년에는 0.954, 검증기간인 2002년에서 2003년은 0.912로 비교적 높게 나왔다. 보정 및 검증의 수행에 있어서 참값으로 가정한 SWMM의 모의결과와 WEP 모형의 모의결과를 비교해 보았으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 그림 4(a)는 보정기간 중 2001년 7월 28일 13시에서 8월 2일 12시까지의 수문곡선을 도시한 것이며, 그림 4(b)는 검증기간 중 2003년 7월 27일 0시부터 7월 30일 0시까지의 수문곡선을 도시한 것이다. 보정 및 검증기간 모두 SWMM과 WEP 모형의 첨두 도달시간이 일치하는 것을 볼 수 있으며, 첨두유량도 대부분 비슷하게 모의되는 것을 확인할 수 있었다.

3.4 물순환 모의결과

WEP 모형을 이용하여 모의한 2003년 도림천 유역의 연간 물수지 현황은 다음의 그림 5와 같다. 물순환 모의결과 도림천 유역은 도시화에 의한 불투수율의 증가로 인해 직접유출이 총 강우 대비 65.2%나 발생하며, 침투는 13.5%밖에 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 도시화에 의한 지하수 취수량의 증가로 인해 지하수위는 저하되어 침투량 대비 15.8%만이 기저유출에 의해 하천으로 유출되는 왜곡된 물순환을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 위의 결과는 도림천 유역



(a) Calibration (2001)

(b) Verification (2003)

그림 4. 보정 및 검증결과

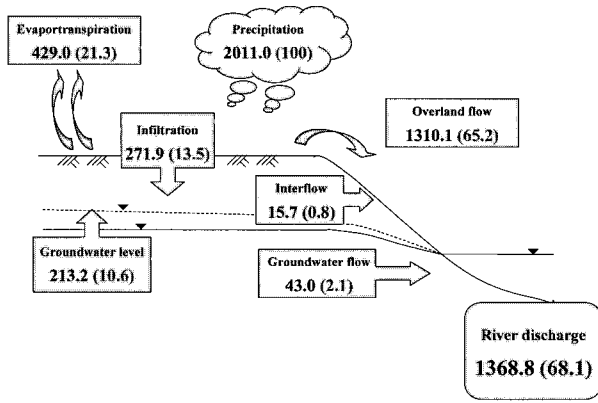


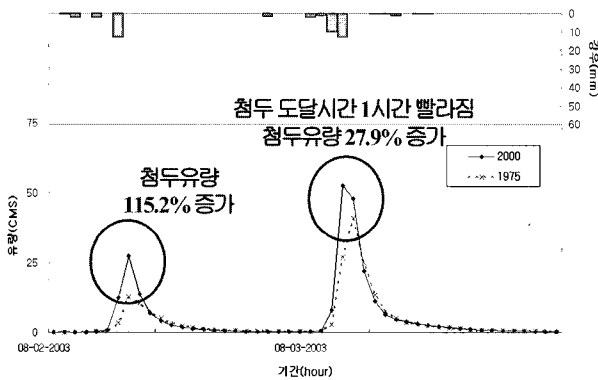
그림 5. 물순환 모의결과

주1) 단위는 mm
주2) ()는 강수량 대비 %

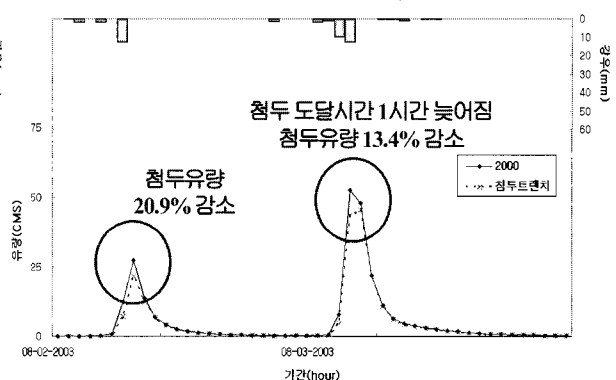
에서 취수되고 있는 생·공용수량의 지하수량을 고려하지 않고 모의한 결과이다. 따라서, 실제로 침투량 중 상당부분은 지하수 취수량에 의해 대수층 밖으로 유출될 것으로 추정되며 이 경우 지하수위의 상승은 모의결과보다는 적어질 것으로 사료된다.

4. 물순환 회복을 위한 기상모의

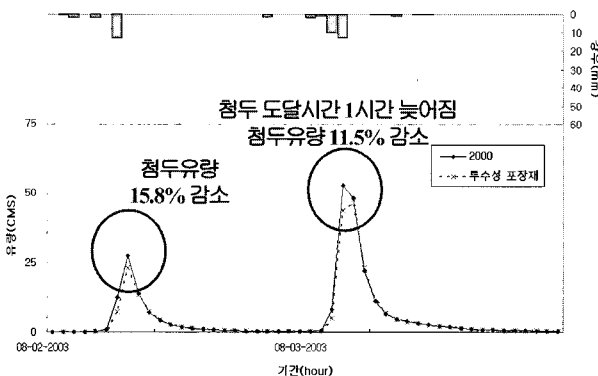
도립천 유역의 물순환 모의결과 도시의 개발로 인해 왜곡된 물순환을 보이는 것을 알 수 있었다. 따라서, 본 연구에서는 도시화로 인해 유역의 물순환에 영향을 미치는 요소 중 불투수면 증가에 따른 유출특성의 변화를 알아보기 위해서 1975년의 토지이용도와 2000년의 토지이용도를 사용하여 2003년도 전체기간에 대한 물순환 모의를 다시 수행하였다. 또한 왜곡된 물순환 형태를 나타내는 도시하천을 도시개발 이전의 물순환 형태로 회복시키기 위한 대안들 중 침투트렌치와 투수성 포장재의 설치효과를 역시 2003년도에 대하여 모의하였다. 각 모의결과들의 유출특성을 비교하기 위해서 2003년 8월 2일 1시에서 8월 3일 24시까지의 수문곡선을 도시하였으며, 아울러 침투유량 및 침투 도달시간으로 비교하여 그림 6에 나타내었다. 또한 각 모의결과들의 연간 물수지 현황을 표 1 및 그림 7에 나타내었다.



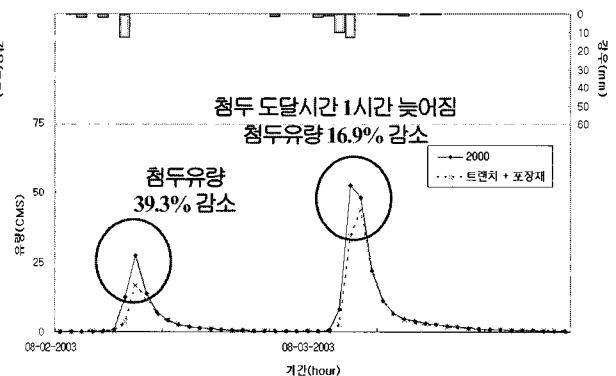
(a) 도시개발 전·후의 토지이용도 변화



(b) 침투트렌치 설치



(c) 투수성 포장재 이용



(d) 트렌치와 투수성 포장재의 동시적용

그림 6. 대안별 유출특성 비교

주1) (a)는 과거(1975년 토지이용도)의 물순환 모의를 기준으로 비교한 결과
주2) (b), (c), (d)는 현재(2000년 토지이용도)의 물순환 모의를 기준으로 비교한 결과

4.1 토지이용도 변화

일반적으로 분포형 모형은 집중형 모형보다 지역의 공간적인 변동성을 잘 표현할 수 있다. 하지만 분포형 모형도 단위격자 내에서는 대표값을 사용하기 때문에 격자 내에 포함된 다양한 토지이용 현황을 반영할 수는 없다. 하지만 WEP 모형은 토지이용의 처리에서는 모자이크법을 사용하여 일반 분포형 모형과 달리 격자 내에 포함된 다양한 토지이용 현황을 비교적 세밀하게 반영할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 도시개발로 인한 불투수율 변화가 유출특성에 미치는 영향을 살펴보기 위해 국토지리정보원에서 제작한 1975년도의 토지이용도와 2000년의 토지이용도를 이용하여 물순환 모의를 수행하였다. 그림 8(a)과 그림 8(b)에 각각 1975년과 2000년의 토지이용도를 나타내었으며, 과거에 비해 도시화가 상당히 진행된 것을 그림으로 간단히 확인할 수 있

었다. WEP 모형의 모자이크법을 이용하여 토지이용 현황도를 분석한 결과 도립천 유역의 불투수율은 도시화에 의해 과거 1975년의 34.9%에서 현재 2000년의 53.6%로 18.7%가 증가한 것을 알 수 있었다.

2003년 8월 2~3일 호우사례를 비교한 결과 첫 번째 침두시에는 과거보다 115.2%의 유량이 증가하였으며, 두 번째 침두시에는 유량이 27.9%가 증가하고 도달시간은 1시간 빨라진 것을 알 수 있었다(그림 6(a)). 연간 물수지 현황(표 1(a) 및 그림 7(a))을 보면 도시개발 이전에 비해 증발산은 17.0%가 감소하고, 지표면유출은 22.0% 증가했으며, 35.3%의 침투량 감소에 의해 중간 및 기저유출도 각각 21.9%와 24.3% 감소한 것을 확인할 수 있었다. 결과적으로 하천유출은 18.9%가 증가하였지만 이것은 지표면유출의 증가로 인한 결과이므로 도시화로 인해서 홍수기 유량이 증가하고 갈수기 유량이 감소하는 왜곡된 물순환 현상이 나타나는 것을 알

표 1. 연간 물수지 현황

(a) 도시개발 전·후의 토지이용도 변화

성분 \ 모의기준	1975년	2000년	차이
불투수율 (%)	34.9	53.6	18.7 (53.6)
증발산 (mm)	517.0	429.0	-88.0 (-17.0)
침투 (mm)	420.2	271.9	-148.3 (-35.3)
지표면유출 (mm)	1073.8	1310.1	236.3 (22.0)
중간유출 (mm)	20.1	15.7	-4.4 (-21.9)
기저유출 (mm)	56.8	43.0	-13.8 (-24.3)
하천유출 (mm)	1150.8	1368.8	218.0 (18.9)
침투유량 1 (m ³ /s)	12.7	27.3	14.6 (115.2)
침투유량 2 (m ³ /s)	41.1	52.5	11.4 (27.9)

(b) 침투트랜치 설치

성분 \ 모의기준	2000년	침투트랜치	차이
불투수율 (%)	53.6	53.6	0.0 (0.0)
증발산 (mm)	429.0	429.4	0.4 (0.1)
침투 (mm)	271.9	378.8	106.9 (39.3)
지표면유출 (mm)	1310.1	1202.8	-107.3 (-8.2)
중간유출 (mm)	15.7	30.9	15.2 (96.8)
기저유출 (mm)	43.0	51.2	8.2 (19.1)
하천유출 (mm)	1368.8	1284.8	-84.0 (-6.1)
침투유량 1 (m ³ /s)	27.3	21.6	-5.7 (-20.9)
침투유량 2 (m ³ /s)	52.5	45.5	-7.0 (-13.4)

(c) 투수성 포장재 이용

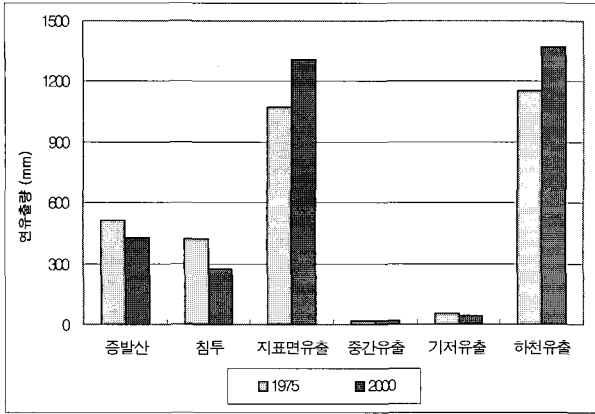
성분 \ 모의기준	2000년	투수성 포장재	차이
불투수율 (%)	53.6	45.2	-8.4 (-15.7)
증발산 (mm)	429.0	459.0	30.0 (7.0)
침투 (mm)	271.9	338.2	66.3 (24.4)
지표면유출 (mm)	1310.1	1213.8	-96.3 (-7.4)
중간유출 (mm)	15.7	19.3	3.6 (22.9)
기저유출 (mm)	43.0	53.5	10.5 (24.4)
하천유출 (mm)	1368.8	1286.6	-82.2 (-6.0)
침투유량 1 (m ³ /s)	27.3	23.0	-4.3 (-15.8)
침투유량 2 (m ³ /s)	52.5	46.5	-6.0 (-11.5)

(d) 트랜치와 투수성 포장재의 동시적용

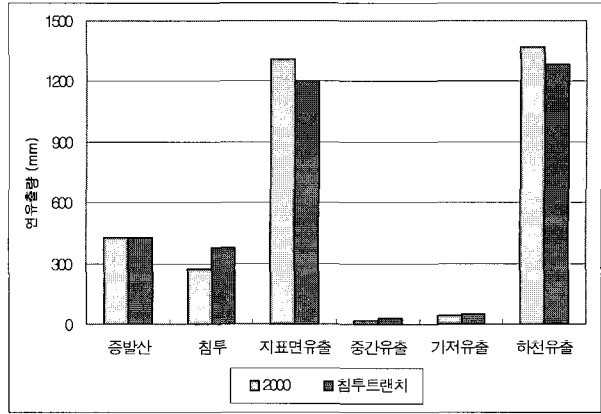
성분 \ 모의기준	2000년	트랜치 + 포장재	차이
불투수율 (%)	53.6	45.2	-8.4 (-15.7)
증발산 (mm)	429.0	459.6	30.6 (7.1)
침투 (mm)	271.9	443.5	171.6 (63.1)
지표면유출 (mm)	1310.1	1107.9	-202.2 (-15.4)
중간유출 (mm)	15.7	35.9	20.2 (128.7)
기저유출 (mm)	43.0	62.1	19.1 (44.4)
하천유출 (mm)	1368.8	1206.0	-162.8 (-11.9)
침투유량 1 (m ³ /s)	27.3	16.6	-10.7 (-39.3)
침투유량 2 (m ³ /s)	52.5	43.7	-8.8 (-16.861)

주1) (a)의 ()는 과거(1975년 토지이용도)의 물순환 모의대비 %

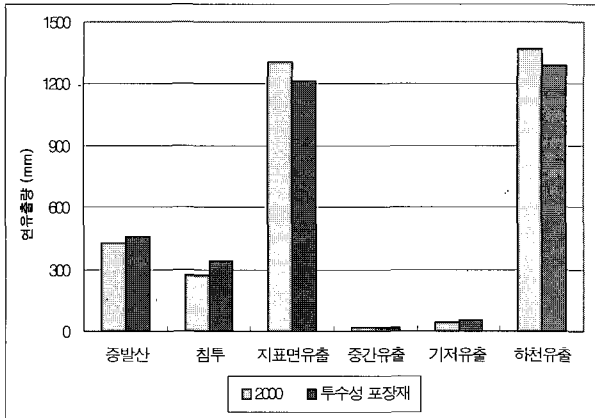
주2) (b), (c), (d)의 ()는 현재(2000년 토지이용도)의 물순환 모의대비 %



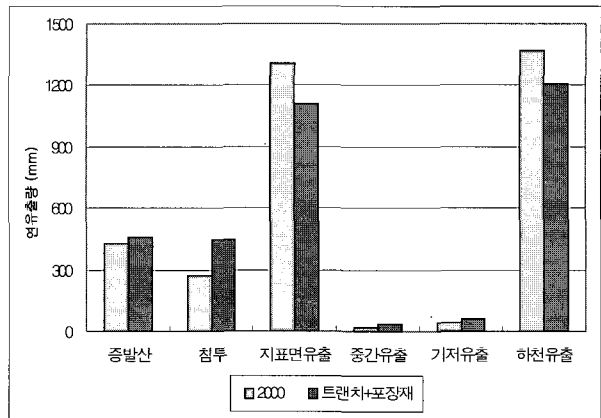
(a) 도시개발 전·후의 토지이용도 변화



(b) 침투트랜치 설치

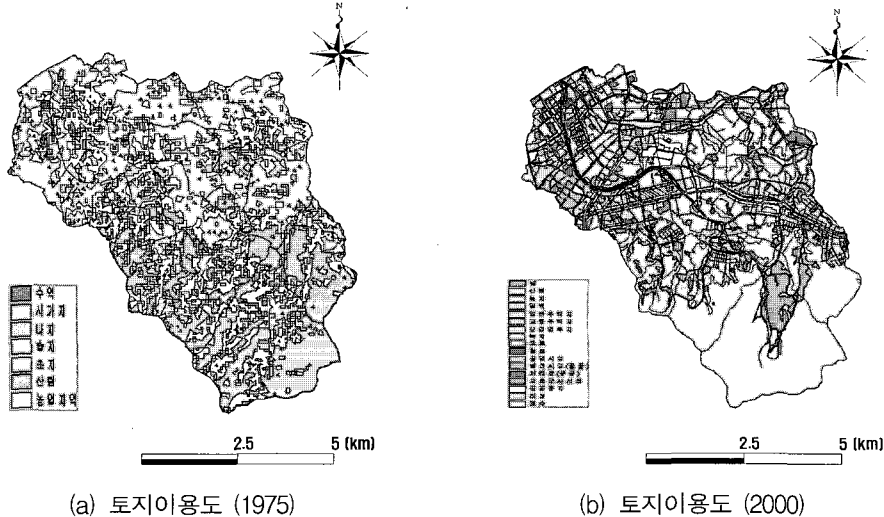


(c) 투수성 포장재 이용



(d) 트랜치와 투수성 포장재의 동시적용

그림 7. 물순환 회복 대안별 연간 물수지 비교



(a) 토지이용도 (1975)

(b) 토지이용도 (2000)

그림 8. 도시개발 전·후의 토지이용도 비교

수 있었다. 다만 도시개발 전·후의 중간유출과 기저유출의 차이가 많이 나지 않은 이유는 두 경우 모두 2002년 12월 31일 24시의 지하수위를 초기값으로 동일하게 적용하여 모의한 결과이기 때문으로 추정된다. 실제로

과거의 지하수위는 현재보다 높아서 지표면에 더 가까웠을 것으로 짐작되며 토지이용 현황도에 의한 불투수율 차이와 과거의 지하수위 상태를 함께 모의에 적용하였다면 도시화에 의한 중간유출 및 기저유출 차이는 본

결과보다 더 컸을 것으로 사료된다.

4.2 침투트렌치 설치

WEP 모형은 침투트렌치의 적용에 있어서 Japan Association for Rainwater Storage and Infiltration Technology에서 공표한 기준에 근거하며, 설치기준은 다음과 같다(Jia et al., 2001).

- ㉠ 지표면 경사(land slope)는 10% 이하이어야 함
- ㉡ 흙(soil)은 진흙(clay)이 아니어야 함
- ㉢ 지하수위(groundwater level)는 지표면에서 2 m 이하이어야 함
- ㉣ 트렌치 밀도(density)는 450 m/ha 보다 작아야 함

위의 설치기준에 의해 WEP 모형은 유역의 입력자료에 대하여 자체적으로 트렌치의 설치 가능한 위치와 길이를 계산해 준다. 또한 트렌치의 제원은 1.5 m(width) × 1.0 m(depth)가 모형의 기본값으로 입력되어 있으며 모든 격자에 동일하게 적용된다. 본 연구에서 WEP 모형에 의해서 계산되어진 격자별 트렌치 적용위치 및 길이는 그림 9(a)와 같으며, 격자마다 최대 39 m까지 설치가 가능하고 총 길이는 55,423.8 m로 계산되었다.

그림 6(b)를 보면 침투트렌치 설치로 인해 첫 번째 침투시에는 20.9%의 유량이 감소하였고, 두 번째 침투시에는 유량은 13.4% 감소하였고 도달시간은 1시간 늦어지는 것을 확인할 수 있다. 연간 물수지 현황(표 1(b) 및 그림 7(b))을 보면 침투트렌치 설치로 인해 증발산은 0.1%로 미소하게 증가하였으나 지표면유출은 8.2% 감소한 것을 알 수 있다. WEP 모형의 개발자인 Jia et al. (2001)의 결과에서도 침투트렌치 모의결과 증발산량이 381 mm에서 388 mm로 약 0.2% 증가하였는데, 증발산량이 적은 양이라도 증가하는 이유는 트렌치 설치에 의해 침투량이 증가하면서 결과적으로 토양수분에 영향을

미치고, 토양수분의 증가에 의해 식물뿌리의 흡수량이 증가한 것으로 유추할 수 있다. 또한 침투는 39.3%, 중간 및 기저유출도 각각 96.8%와 19.1%가 증가하였고, 하천유출은 6.1%가 감소하였으나, 이는 지표면유출 감소에 의한 홍수기 유량의 감소에 의한 결과이다.

4.3 투수성 포장재 이용

WEP 모형에는 투수성 포장재 설치에 대한 정량적인 분석을 할 수 있는 계산모듈은 없다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 WEP 모형은 분포형 모형으로서 유역 내 도로의 위치와 면적을 모자이크법을 이용하여 각 격자마다 세밀하게 물순환 모의에 반영할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 유역 내 모든 격자의 토지이용 현황 입력자료 중 불투수면에 해당하는 도로의 면적을 투수면에 해당하는 나지로 대체하여 근사적인 투수성 포장재 설치효과에 대한 모의를 수행하였다. 그림 9(b)는 도립천 유역 내 도로의 위치를 나타내고 있으며, 도로가 차지하는 면적은 전체 유역면적 대비 약 9%에 해당된다. 이를 WEP 모형의 모자이크법을 이용하여 나지로 변환한다고 가상해 보면 도립천 유역의 불투수율은 45.2%이 되며 현재의 불투수율에 대비해서 15.7%가 감소되는 것을 알 수 있었다.

그림 6(c)를 보면 투수성 포장재 설치로 인해 첫 번째 침투시에는 유량이 15.8%, 두 번째 침투시에는 유량은 11.5%가 감소하였고 도달시간은 1시간 늦어지는 것을 확인할 수 있었다. 연간 물수지 현황(표 1(c) 및 그림 7(c))을 보면 투수성 포장재 설치로 인해 증발산은 7.0%가 증가하였고, 지표면유출은 7.4%가 감소하였다. 또한 침투는 24.4%, 중간 및 기저유출도 각각 22.9%와 24.4% 증가하였고, 하천유출은 6.0% 감소하였으나, 역시 침투트렌치 설치와 마찬가지로 지표면유출 감소에 의한 홍수기 유량의 감소에 의한 결과이다.

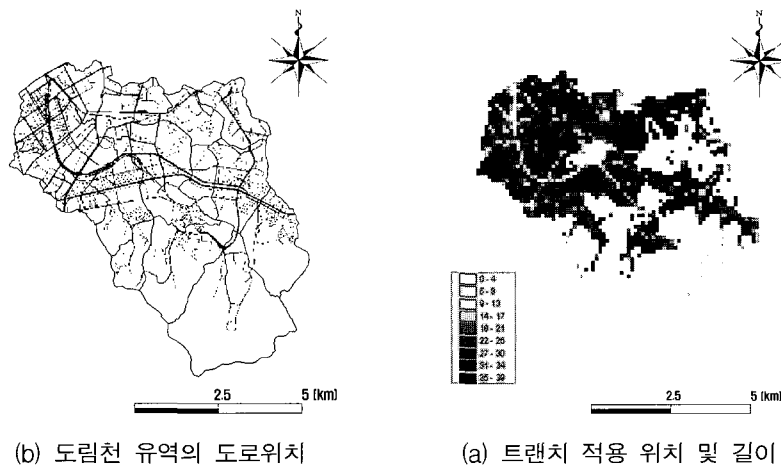


그림 9. 침투트렌치 및 투수성 포장재의 적용

표 2. 물순환 회복 대안별 연간 물수지 비교

성분 \ 모의기준	2000년	1975년	침투 트랜치	투수성 포장재	트랜치 + 포장재
불투수율 (%)	53.6 (100)	34.9 (-34.9)	53.6 (0.0)	45.2 (-15.7)	45.2 (-15.7)
증발산 (mm)	429.0 (100)	517.0 (20.5)	429.4 (0.1)	459.0 (7.0)	459.6 (7.1)
침투 (mm)	271.9 (100)	420.2 (54.5)	378.8 (39.3)	338.2 (24.4)	443.5 (63.1)
지표면유출 (mm)	1310.1 (100)	1073.8 (-18.0)	1202.8 (-8.2)	1213.8 (-7.4)	1107.9 (-15.4)
중간유출 (mm)	15.7 (100)	20.1 (28.0)	30.9 (96.8)	19.3 (22.9)	35.9 (128.7)
기저유출 (mm)	43.0 (100)	56.8 (32.1)	51.2 (19.1)	53.5 (24.4)	62.1 (44.4)
하천유출 (mm)	1368.8 (100)	1150.8 (-15.9)	1284.8 (-6.1)	1286.6 (-6.0)	1206.0 (-11.9)
침투유량 1 (m ³ /s)	27.3 (100)	12.7 (-53.5)	21.6 (-20.9)	23.0 (-15.8)	16.6 (-39.3)
침투유량 2 (m ³ /s)	52.5 (100)	41.1 (-21.8)	45.5 (-13.4)	46.5 (-11.5)	43.7 (-16.9)

주) () 는 현재(2000년 토지이용도)의 물순환 모의대비 %

4.4 침투트랜치와 포장재의 동시적용

최근에는 우수유출 저감시설 및 침투증진시설들을 적용하는데 있어서 설치효과를 극대화시키기 위해서 개별적인 적용보다는 여러 시설들을 동시에 적용하는 방향으로 발전되고 있다. 따라서, 침투트랜치와 투수성 포장재의 동시적용에 대한 모의를 추가적으로 수행하였다.

그림 6(d)를 보면 침투트랜치와 투수성 포장재의 동시시설치로 인해 첫 번째 침투시에는 39.3%의 유량이 감소하였고, 두 번째 침투시에는 유량은 16.9%가 감소하고 도달시간은 1시간 늦어지는 것을 알 수 있다. 연간 물수지 현황(표 1(d) 및 그림 7(d))을 보면 증발산은 7.1%가 증가하고, 지표면유출은 15.4%가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 침투는 63.1%, 중간 및 기저유출도 각각 128.7%와 44.4% 증가한 것을 확인할 수 있었다. 또한 지표면유출 감소에 의해 하천유출도 11.9%가 감소한 것을 알 수 있었다.

마지막으로 연간 물수지 현황(표 2)을 통해서 각 물순환 모의결과들의 유출특성을 비교해 본 결과, 침투트랜치와 투수성 포장재를 동시에 유역에 적용하여 모의한 결과가 도시개발 이전의 유출양상에 가장 근접하는 것을 알 수 있었다. 즉, 두 대안의 동시적용의 모의결과를 1975년의 토지이용도를 적용한 모의결과와 비교하였을 때 지표면유출은 약 3.2% 차이가 나는 것을 알 수 있었으며, 침투량은 개발이전보다 오히려 5.5% 더 많이 증가한 것을 알 수 있었다. 중간 및 기저유출 역시 두 대안의 동시적용이 각각 78.6%와 9.3%, 즉 유역평균 절

대량으로는 15.8 mm와 5.3 mm 더 많이 증가하는 것을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후연구

본 연구에서는 WEP 모형을 이용하여 도립천 유역에 대한 물순환 모의를 수행하였고, 도시개발 전·후의 토지이용도를 사용하여 도시화에 의한 불투수율 증가가 유출특성에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 도시의 개발로 인해 왜곡된 물순환 체계를 회복시키기 위해서 침투트랜치와 투수성 포장재 설치 모의를 수행하여 각 대안들의 효과를 살펴보았다.

2003년도의 물순환 모의결과 도립천 유역은 도시화에 의한 불투수율의 증가로 총 강우 대비 직접유출이 65.2%나 발생하며, 침투는 13.5% 밖에 발생하지 않는 것을 알 수 있었다. 또한 지하수 취수량의 증가로 인한 지하수위 저하로 인해 침투량 대비 15.8%만이 기저유출에 의해 하천으로 유출되는 왜곡된 물순환을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

도시개발 전·후의 토지이용 변화에 따른 물순환 모의 결과, 도시개발로 인한 18.7%의 불투수율 증가는 도시개발 전에 비해 침투 도달시간의 가속과 침투 및 총유출량의 증가를 가져온 것을 알 수 있었다. 아울러 침투량은 35.3% 감소하였으며, 이에 의해 중간 및 기저유출은 각각 21.9%와 24.3% 감소한 것을 확인할 수 있었다.

침투트랜치와 투수성 포장재의 설치효과를 1975년의 토지이용도를 적용한 모의결과와 비교하여 분석하였다.

분석결과 두 대안을 함께 적용했을 경우 지표면유출은 약 3.2% 차이가 나는 것을 알 수 있었으며, 침투량은 개발이전보다 오히려 5.5% 더 많이 증가한 것을 알 수 있었다. 중간 및 기저유출 역시 두 대안의 동시적용이 각각 78.6%와 9.3%, 즉 유역평균 절대량으로는 15.8 mm와 5.3 mm 더 많이 증가하는 것을 알 수 있었다.

하지만 위의 결과들은 도림천 유역 전체에 대해서 대안을 적용했을 경우의 결과이다. 트랜치의 경우는 모형의 지형적인 특성만 고려되었고, 투수성 포장재의 경우도 차량의 이용이 빈번한 도로보다는 주차장이나 인도 등에 설치하는 경우가 유지관리 측면에 유리하나 본 연구에서는 주차장이나 인도에 대한 자료가 부족하여 도로에 적용하는 경우로 모의를 하였다. 즉, 실제로 대안을 적용하기 위해서는 설치지역의 사회적, 지역적인 상황 및 설치비용 등의 경제적인 면도 고려하여야 할 것이다. 또한 본 연구에서 사용된 WEP 모형은 침투트랜치의 경우에 모형에 입력된 유역의 지형자료를 바탕으로 모형 자체적으로 침투트랜치의 위치 및 길이를 계산하게 되어있다. 따라서, 사용자가 임의로 위치 및 길이를 정할 수 없어 현실성을 고려한 대안 적용을 모의하기에 어려움이 있으며, 이 점은 앞으로 WEP 모형의 개선되어야 할 부분으로 사료된다.

6. 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 안양천 유역의 물순환 건전화 기술개발 과제(1-7-2)와 서울대/한양대 사회기반 및 건설기술 인력 양성사업단, 서울대학교 공학연구소의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 또한 WEP 모형의 프로그램 제공 및 모형 구축과 모의에 있어서 많은 도움을 주신 한국건설기술연구원의 김현준 박사와 노성진 연구원에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김윤영 (2000). "도시지역 지하수의 수리지질학적 특성: 서울지역 지하수 시스템 분석." 박사학위논문, 서울대학교.
- 노성진, 김현준, 장철희, 홍일표 (2004). "도시지역 불투수율 변화가 청계천 유역 물순환에 끼치는 영향분석." 2004년 학술발표회 논문집 CD, 대한토목학회, pp. 2161-2166.
- 동일기술공사 (2002). 도림천 하천정비 기본계획 보고서. 서울특별시.
- 삼안기술공사 (1983). 안양천 유역종합 치수대책 보고서. 건설교통부.
- 서울대학교 (2004). "안양천 유역의 물순환 건전화 기술 적용." 연구보고서, 과학기술부.
- 심재현, 이철규, 이종규, 김진영 (2004). "침투통의 설치에 따른 치수효과 분석." 2004년 학술발표회 논문집 CD, 한국수자원학회, pp. 1-5.
- 연세대학교 (2000). "우수유출 저감시설 시범사업 검토연구." 연구보고서, 서울특별시.
- 환경부 (2002). 상수도 통계연보.
- 土木研究所 (2002). WEP 해설서. 土木研究所.
- Eric, W., Anja, V.L., Per, J., and Peter S.M. (1999). "Hydrologic behaviour of stormwater infiltration trenches in a central urban area during 2 3/4 years of operation." *Water Science and Technology*, Vol. 39, No. 2, pp. 217-224.
- Freeze, R.A., and Cherry, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA.
- Jia, Y. (1997). *Integrated Analysis for Water and Heat Balances in Tokyo Metropolis with a Distributed Model*. Ph.D. Dissertation. University of Tokyo, Japan.
- Jia, Y., Guangheng, N., Yoshihisa, K., and Tadashi, S. (2001). "Development of WEP model and its application to an urban watershed." *Hydrological Processes* (J), Vol. 15, pp. 2175-2194.
- Jia, Y., Wang, H., Wang, J., and Qin, D. (2004). "Distributed hydrological modeling and river flow forecast for water allocation in a large-scaled inland basin of northwest China." *Proceeding of the 2nd APHW Conference*, Singapore, Singapore, Vol. 2, pp. 285-292.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models." *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- Satoshi, F. (1995). "Study on storm water control by permeable pavement and infiltration pipes." *Water Science and Technology*, Vol. 32, No. 1, pp. 25-32.
- Sorooshian, S., Gupta, V.K., and Fulton, J.L. (1983). "Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models - Influence of calibration data variability and length on model credibility." *Water Resources Research*, Vol. 19, NO. 2, pp. 251-259.

(논문번호:05-24/접수:2005.2.7/심사완료:2005.05.19)