

## 우수유출저감 시설의 최적위치 결정

장수형 · 이지호\* · 유철상\* · 한수희\*\* · 김상단\*\*†

고려대학교 방재과학기술연구센터

\*고려대학교 건축·사회환경공학과

\*\*부경대학교 환경시스템공학부

## Optimal Location of Best Management Practices for Storm Water Runoff Reduction

Su Hyung Jang · Jiho Lee\* · Chulsang Yoo\* · Suhee Han\*\* · Sangdan Kim\*\*†

Research Center for Disaster Prevention Science and Technology, Korea University

\*Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

\*\*Department of Environmental System Engineering, Pukyong National University

(Received 4 February 2008, Accepted 25 February 2008)

### Abstract

A distributed hydrologic model of an urban drainage area on Bugok drainage area in Oncheon stream was developed and combined with a optimization method to determine the optimal location and number of best management practices (BMPs) for storm water runoff reduction. This model is based on the SCS-CN method and integrated with a distributed hydrologic network model of the drainage area using system of 4,211 hydrologic response units (HRUs). Optimal location is found by locating HRU combination that leads to a maximum reduction in peak flow at the drainage outlet in this model. The results of this study indicate the optimal locations and numbers of BMPs, however, for more exact application of this model, project cost and SCS-CN reduction rate of structural facilities such infiltration trench and pervious pavement will have to be considered.

**keywords** : Best management practice, Hydrologic model, Optimization, Storm water runoff reduction

## 1. 서론

자연하천유역의 도시화는 우수유출 증가 및 도달시간 감소로 홍수피해 뿐 아니라 하천의 수질에도 악영향을 끼친다. 이는 미개발지역의 개발에 따른 수문학적 변화에 의한 것으로 불투수지역의 높은 비율과 인공적인 배수시설의 존재가 주된 원인이다. 개발된 도시하천유역을 자연하천유역으로 복원하는 것은 현실적으로 어렵기 때문에 최적관리기법(BMPs)을 도입하여 침투트렌치(infiltration trench), 투수성포장(pervious pavement), 습지(grass swale), 완충지(buffer strip), 유수지(detention basin), 저류지(retention basin), 생태저류시설(bioretention basin) 등을 설치 및 관리하여 피해를 최소화하고자 노력하고 있다(Perez-Pedini et al., 2005).

과거에는 이들 시설들의 용량 및 규모를 결정하기 위해 BMPs를 도입한 반면 근래 들어서는 유수지의 설계, 운영 뿐 아니라 시스템의 최적화(Behera et al., 1999; Harrell and Ranjithan, 2003; Yeh and Labadie, 1997), 유역 내 저류시설의 최적 위치 및 개수 선정(Mays and Bedient, 1982; Zhen et al., 2004) 등에 포괄적으로 활용되고 있다. Perez-Pedini 등(2005)은 도시화나 개발된 유역을 투수성

포장이나 생태저류시설, 침투시설 등을 이용하여 개발이전의 수문학적 기능이 복원되도록 토지를 조성하는 LID(low impact development)와 같은 총체적인 기법을 고려하여 우수유출관리를 위한 침투기반의 최적관리기법을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 Perez-Pedini 등(2005)의 연구를 기본적인 바탕으로 하되 유출해석은 국내에서도 잘 알려진 SCS-CN을 기반으로 유역을 적정 크기의 HRUs(hydrologic response units)로 구분하여 D8 알고리즘을 통한 흐름해석을 수행하고 저감시설의 최적위치 및 개수를 결정하기 위한 침투기반의 수문모형을 개발하여 대상유역에 적용하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 연구대상 유역의 개요

수문모형 개발을 위한 표본유역은 부산광역시 수영강의 제 1지류로 지방2급 하천인 온천천유역 좌안부에 위치한 부곡배수분구(5.79 km<sup>2</sup>) 중 하나의 배수시스템으로 구분할 수 있도록 배수분구(2.79 km<sup>2</sup>)를 재구성하여 선정하였다(Fig. 1). 모형개발에 필요한 대상유역의 DEM, 토지이용도, 토양도, 유역경사, 흐름누적 그리고 흐름방향 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(2008) 자료를 이용 GIS 분석을

† To whom correspondence should be addressed.

skim@pknu.ac.kr

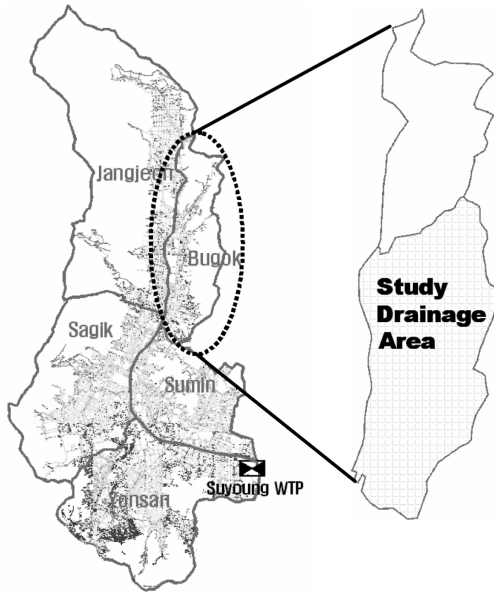


Fig. 1. Overview of the study area.

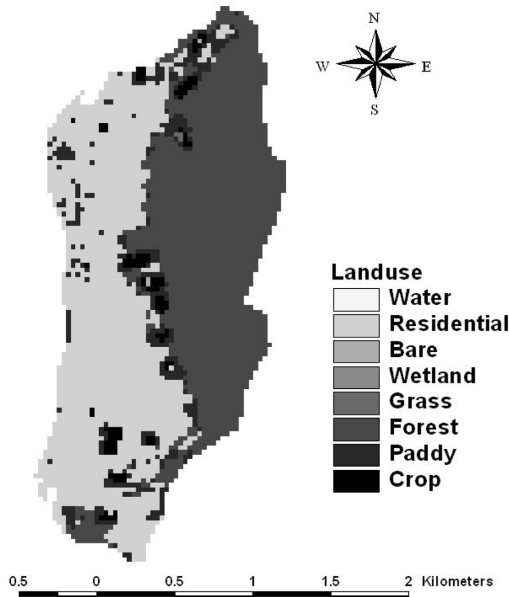


Fig. 2. Primary land uses.

수행하여 구축하였다. 본 연구대상 유역은 전체 유역의 46%, 산림지역을 제외하면 82%가 시가지로 구성된 전형적인 도시하천 유역이다(Fig. 2). 또한 강우-유출해석을 위해 기상청 부산관측소의 1976~2006년(31개년) 강우자료를 사용하였다.

2.2. 분포형 수문모형의 개발

컴퓨터 기능의 향상 및 DB의 질적 향상에 기인하여 많은 분포형 강우-유출모형이 개발(Abbott and Refsgaard, 2002; Beven, 2001)되어 왔으며 수학적 해석기법과 추상적 개념을 도입하여 복잡한 유역의 수문과정을 모형화하는 연구가 진행되어 왔다. 유출곡선지수(SCS, 1986)는 토지이용 변화와 유출량에 기인하는 BMPs의 영향을 효과적으로 반

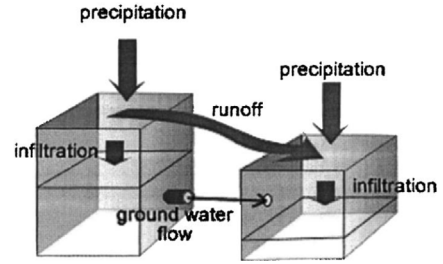


Fig. 3. Conceptualization of the distributed hydrologic model (Perez-Pedini et al., 2005).

영할 수 있는 방법으로 다른 강우-유출모형과는 달리 토지 이용변화를 효과적으로 표현할 수 있어 효율적이다. 분포형 수문모형에 대한 자세한 내용은 Perez-Pedini(2004)의 연구에 제시되어 있으며 BMP 선정 위치에 따라 하류하천에 끼치는 영향이 크기 때문에 적절한 위치선정은 중요한 요소 중의 하나이다. 따라서 본 연구에서는 도시지역을 기반으로 하여 분포형 수문모형을 구성하고, 이를 통하여 유역내 홍수량을 가장 저감시키는 BMPs의 위치를 결정하고자 하였다.

본 연구에서는 Matlab 7.0을 기반으로 모형을 구성하였으며, 30 m 길이의 정방형으로 구성하여 4,211개의 HRUs로 유역을 구성하였다. 각 HRUs에서의 흐름은 O'Callaghan and Mark(1984)에서 개발된 D8 알고리즘을 이용하여 인접한 8개의 HRUs 중 가장 낮은 곳으로 흐르도록 구성되었다. D8 알고리즘에 대한 보다 기본적인 사항은 윤용남 등(2002)을 참조할 수 있다. HRUs 및 cell-to-cell에서의 유출은 크게 직접유출과 기저유출 성분으로 구분되며, 해석과정에 대한 기본개념은 Fig. 3과 같다. HRUs에서의 공간적인 특성(위치, CN, 고도, 경사, 흐름방향, 흐름누적 등)은 GIS 기법을 적용하였으며 침투기반의 BMP를 위해 LID의 개념을 도입하여 CN 값을 감소시키는 방법을 사용하되 4,211개로 구성된 HRUs 중 침투홍수량 저감량을 고려하였다.

Sample 등(2001)은 어떤 특정 HRU에서의 최적 BMP를 결정하였으나 본 연구에서는 전체 유역을 하나의 시스템으로 구성하여 토지이용 및 토양조건, 건설 및 유지관리 비용과 관계없이 모든 HRUs에서 동일한 조건에서 CN 저감에 따른 유출저감효과를 기준으로 선정하였다.

호수로 인한 유출곡선지수의 초기손실, 침투와 유출성분의 시간적 거동특성은 기본적으로 Chow 등(1988) 및 Perez-Pedini 등(2005)의 방법을 기본으로 하되 직접유출성분은 SCS-CN 기반의 총우량-유효우량의 관계를 이용하였다.

초기손실( $Ab_{i,j}$ , mm)은 토양의 최대잠재보유수량( $S_{max,i,j}$ , mm)과  $\lambda_2$ 의 비율로 식 (1)과 같으며, 최대잠재보유수량은 SCS 유출곡선지수(CN)를 이용하여 식 (2)로 나타낸다.

$$Ab_{i,j} = \lambda_2 \cdot S_{max,i,j} \tag{1}$$

$$S_{max,i,j} = \lambda_1 \left( \frac{25400}{CN_{i,j}} - 254 \right) \tag{2}$$

여기서  $i, j$ 는 HRUs와 관련된 데카르트 좌표계이며  $\lambda_1$ 은 선행함수조건(AMC-I, II, III)의 차이를 표현하기 위한 0~1의 값을 갖는 상수이다. 누가 유효우량( $RC_{i,j,t}$ , mm)은 누가우량( $WC_{i,j,t}$ , mm), 초기손실 그리고 최대 잠재보유수량의 관계로 식 (3)과 같으며 누가 침투량( $IC_{i,j,t}$ , mm)은 누가우량에서 누가 유효우량( $RC_{i,j,t}$ )과 초기손실의 차이로 식 (4)로 표현된다.

$$RC_{i,j,t} = \frac{(WC_{i,j,t} - Ab_{i,j})^2}{(WC_{i,j,t} - Ab_{i,j}) + S_{max,i,j}} \quad (3)$$

$$IC_{i,j,t} = WC_{i,j,t} - RC_{i,j,t} - Ab_{i,j} \quad (4)$$

따라서 구간별 유효우량( $R_{i,j,t}$ , mm)과 구간별 침투량( $I_{i,j,t}$ , mm)은 식 (3)과 (4)에서 산정된 구간별 누가 유효우량 및 누가 침투량의 차이로서 식 (5) 및 식 (6)과 같다.

$$R_{i,j,t} = RC_{i,j,t} - RC_{i,j,t-1} \quad (5)$$

$$I_{i,j,t} = IC_{i,j,t} - IC_{i,j,t-1} \quad (6)$$

한편 HRUs에서의 지하수량( $S_{i,j,t}$ , mm)은 전 시간에서의 지하수량( $S_{i,j,t-1}$ ), 구간별 침투량과 전 시간까지 상류 HRUs에서 유입되는 기저유출( $BF_{i,j,t-1}^{upslope}$ )의 합으로 식 (7)과 같으며 기저유출( $BF_{i,j,t}$ , mm)은 식 (2) 및 (7)의 최대 잠재보유수량과 지하수량의 관계로부터 식 (8)로 표현된다.

$$S_{i,j,t} = S_{i,j,t-1} + I_{i,j,t} + \sum_{i,j} BF_{i,j,t-1}^{upslope} \quad (7)$$

$$BF_{i,j,t} = \begin{cases} r(S_{i,j,t} - hS_{max,i,j}) & \text{if } S_{i,j,t} > hS_{max,i,j} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

여기서  $r$ 은 지하수 유출률을 나타내는 상수이며,  $h$ 는 지하수유출에 기여하지 않는 지하수량의 부분을 나타내는 상수이다. 토양의 초기 저류량( $S_{i,j,0}$ , mm)은 각 HRUs에서 식 (2)의 최대 잠재보유수량과  $S_0$ 의 비율로 식 (9)로 나타낼 수 있다. 만약, 지하수량이 토양의 최대 잠재보유수량보다 크면 더 이상 토양에 저류되지 않고 유출( $GE_{i,j,t}$ )이 발생되며 식 (10)과 같다.

$$S_{i,j,0} = S_0 \cdot S_{max,i,j} \quad (9)$$

$$GE_{i,j,t} = \begin{cases} S_{i,j,t} - S_{max,i,j} & \text{if } S_{i,j,t} > S_{max,i,j} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (10)$$

결과적으로 하천과 연결된  $k$ 번 째 HRUs에서의 유출량 총합( $VQ_{k,t}$ ,  $m^3/s$ )은 기저유출량, 초과 지하유출량 그리고 지표면유출량의 합으로 식 (11)에 의해 계산된다.

$$VQ_{k,t} = \frac{A}{1000} \left[ R_{k,t} + \sum_{i,j} (R_{i,j,t-1}^{upslope} + GE_{i,j,t-1}^{upslope} + BF_{i,j,t-1}^{slope}) \right] \quad (11)$$

한편, HRUs에서 표면류의 유입시간은 미국 연방항공청(Federal Aviation Agency, 1970)에서 제안된 식 (12)에 의해 산정된다.

$$t_s = \frac{0.994(1.1 - C)L^{0.5}}{S^{1/3}} \quad (12)$$

여기서,  $t_s$ 는 유입시간(min)이며,  $C$ 는 합리식의 유출계수,  $L$ 은 표면류의 길이(m)로서 흐름방향에 따라 HRUs의 측면(side length)의 길에 따라  $1 \times side\ length$  또는  $\sqrt{2} \times side\ length$ 로 표현되며  $S$ 는 지표면의 경사(%)로 식 (12)는 도시구역의 유입시간에 흔히 사용되는 공식이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 강우-유출분석

본 연구에서 개발된 침투기반의 수문모형을 이용하여 유역을  $30 \times 30$  m 크기의 4,211개 HRUs구성한 후 표면류의 이동시간을 산정하고 유역출구지점까지 흐름방향(D8)을 따라 cell-to-cell로 도달시간을 누가하면 Fig. 4와 같다. 유역 내 가장 긴 HRU에서의 도달시간은 134분인 것으로 분석되었다. 본 모형의 경우 배수분구의 우수관거망을 완벽하게 고려하지 않았기 때문에 도달시간이 다소 크게 산정되었음을 알 수 있으며, 이는 추후 연구를 통하여 우수관거망을 고려하는 방향으로 모형의 기능추가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

모형의 매개변수  $\lambda_1, \lambda_2, r, h, S_0$ 는 각각 토양의 초기손실, 최대 잠재보유수량, 지하수 유출률, 지하수량, 토양의 초기 지하수량과 관련되며 이들 매개변수를 위한 검증과 보정이 필요하나 불행히도 실측자료 자료가 없어 추후 실측자료가 있는 대상유역을 선정하여 모형의 적용성을 검토할 예정이다. 본 연구에서는 우수유출저감시설의 최적위치 및 개수를 선정하는 방법론 제시를 목적으로 매개변수 값은 Perez-Pedini 등(2005)의 연구내용을 감안하여  $r=0.0044, h=0.2, S_0=0.01$ 을 인용하되 토양의 초기손실 및 최대잠

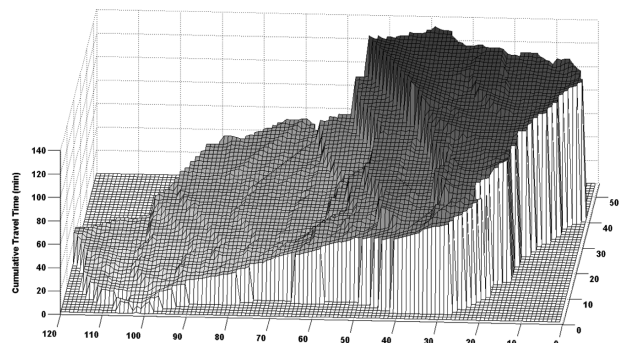


Fig. 4. Cumulative travel time.

재보유수량 관련 매개변수인  $\lambda_1, \lambda_2$ 는 SCS에서 실측자료와의 관계로부터 유도된 값인 1.0과 1.2를 적용하였다.

모형에 적용된 강우는 계획빈도인 100년 확률강우량이며, 강우의 시간분포는 Huff의 4분위법(건설교통부, 2000)을 적용하되 최빈분위는 지속기간별로 검토한 결과 2분위로 선정되었다. 또한 강우의 지속기간은 유역출구 지점에서 침투홍수량이 가장 큰 강우의 임계지속기간이 고려되었다. 개발된 모형을 적용하여 출구지점에서 유출수문곡선을 계산한 결과 침투홍수량은 50.59 m<sup>3</sup>/s인 것으로 분석되었다. 여기서 모형의 계산시간 간격은 1분으로 선정하여 모형을 실행하였다.

3.2. BMPs의 최적위치 결정

우수유출 저감을 목적으로 저감시설의 최적위치를 결정하기 위한 방법은 HRUs에서의 CN 저감량에 따라 유역출구의 침투유출 저감효과를 고려하는 방법을 적용하였다. 적절한 CN 저감량 결정을 위해서는 예정된 침투시설의 종류와 특성에 따라 다르겠지만 정량적인 결정이 어렵기 때문에 일률적으로 20씩 저감하는 방법을 사용하였다.

최적위치 및 개수 결정을 위해 4,211개의 HRUs 중 유출의 기여도가 높은 CN 80이상 1,910개의 HRUs를 대상으로 하였는데 Fig. 2의 토지이용조건 중 주거지역에 해당된다. 선정된 HRUs에서 저감된 CN 값을 적용하여 침투홍수량 저감량 기준으로 최적 BMPs의 개수 수를 100개씩 증가하여 나타내면 Fig. 6과 같다. 선택된 BMPs 설치 위치는 각 cell 별로 CN 값을 저감시켰을 때, 침투홍수량을 가장 많이 저감시키는 cell 순으로 BMPs의 최적위치를 선정하였다. 100 BMPs에서 1.23% 침투홍수량 저감효과가 있으며, 300 BMPs 3.28%, 500 BMPs 4.72%, 1000 BMPs 6.61%로 BMPs가 증가 대비 상대적 저감효과는 점차적으로 줄어들며 최대 7.5%를 넘지 않는 것으로 분석되었다. BMPs의 개수를 선정하기 위해서는 시설의 설치 및 유지비용이 함께 고려되어야 하며, Fig. 6은 단지 BMPs에 따른 침투홍수량 저감율을 표현하는 것이다.

Fig. 7은 저감시설의 최적위치를 공간적으로 도시한 것으로 유역의 출구로부터 도달시간이 상대적으로 긴 HRUs에

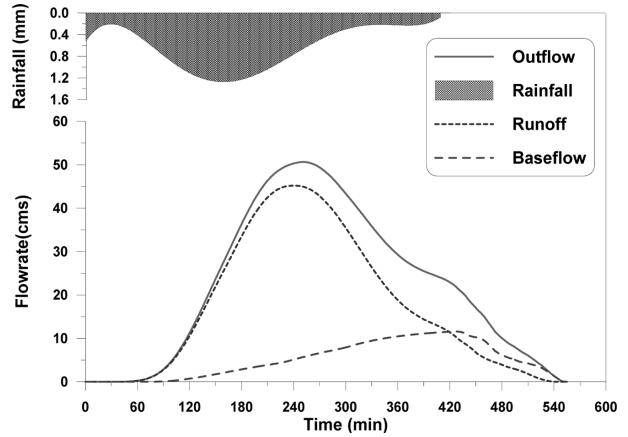


Fig. 5. Outflow hydrograph.

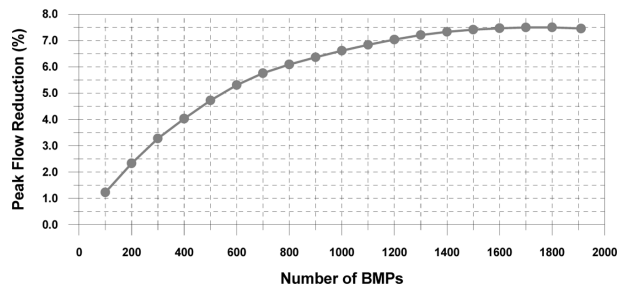


Fig. 6. Trade-off peak flow reduction and number of BMPs.

저감시설을 설치하는 것이 침투홍수량 저감효과가 높은 것으로 분석되었다. 즉, 천변저류지와 같이 일정한 수위 이상의 홍수를 저류하는 공간에서는 유역출구에서 저감효과가 클 것이나 침투와 같은 저류시설에서는 강우 시 경과시간에 따라 토양의 함수조건이 비선형적으로 감소되고 일단 토양이 포화되면 더 이상 침투되지 않고 유출이 발생되며, 상류로부터 유수가 지속적으로 유입되기 때문이다.

Fig. 8은 본 연구에서 선정된 최적 BMPs의 개수 대비 BMPs 설치가능 HRUs인 1,910개와 대상유역 전체인 4,211개에 대하여 일률적으로 CN을 저감 시 효율성을 검토한 것이다. 즉, 동일한 유출저감효과 조건에서 볼 때, 100개의 최적 BMPs를 설치할 경우, 설치가능 HRUs에 대해서는 6.3,

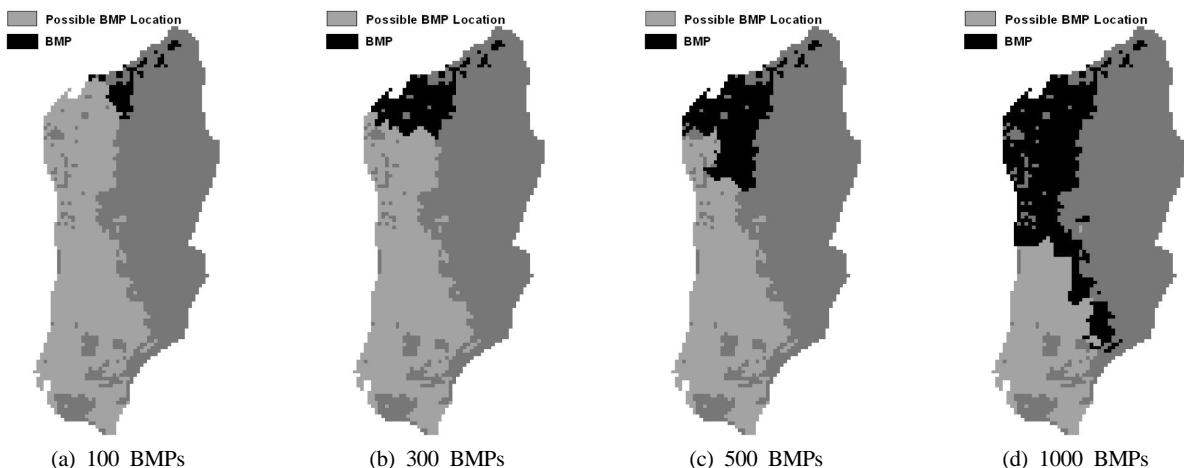


Fig. 7. Optimal Locations of best management practices.

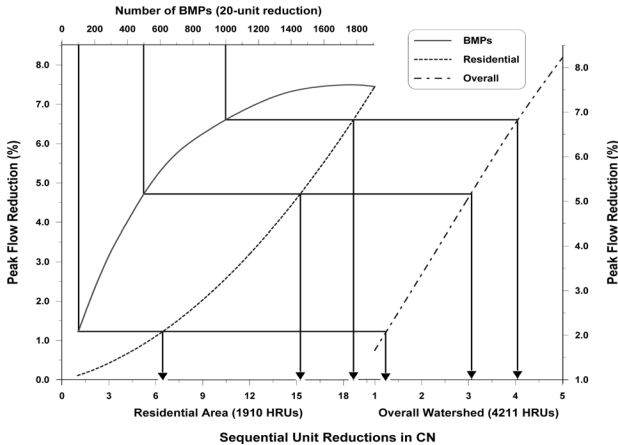


Fig. 8. Comparison of peak flow reductions.

전 유역에 대해서는 1.2의 CN 저감효과를, 500개의 최적 BMPs를 설치할 경우, 설치가능 HRUs에 대해서는 15.2, 전 유역에 대해서는 3.2의 CN 저감효과를, 1000개의 최적 BMPs를 설치할 경우, 설치가능 HRUs에 대해서는 18.5, 전 유역에 대해서는 4.1의 CN 저감효과를 갖는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

도시하천유역의 수문학적 특성을 원상태로 복원하는 것은 어렵기 때문에 유역 내에 적절한 우수유출저감시설을 설치하게 된다. 저감시설 중 유수를 일시 저류하여 유출을 지체시키는 시설은 유출체적의 저감효과는 없고 막대한 공간과 설치 및 유지관리 비용이 든다. 이는 투수성 포장이나 생태저류지 그리고 적절한 침투시설을 설치하여 유출저감 뿐 아니라 비점오염원을 저감시키는 시설이 증가되고 있는 이유이기도 하다. 침투시설의 효과를 극대화하기 위해서는 시설의 특성과 유역의 수문학적 특성이 반영된 기법을 통해 최적위치를 결정하는 것이 유출저감효과와 비용측면에서 효율적이라 할 것이다.

이에 본 연구에서는 우수유출저감을 목적으로 저감시설의 최적위치를 결정하기 위한 침투기반의 수문모형을 개발하였으며, 온천천유역 부곡배수분구를 대상으로 BMPs에 따른 저감효과 및 최적위치를 제시하였다. 개발된 모형은 침투기반의 수문모형으로 유출해석은 SCS-CN을 기반으로 D8 알고리즘에 따라 cell-to-cell로 수행된다. 최적위치를 결정은 4,211개의 HRUs로 구성된 유역에서 유출의 기여도가 높은 CN 80이상 1,910개의 HRUs를 대상으로 CN 20을 저감한 후 침투홍수의 저감효과를 반영하여 BMPs를 선정하였다. BMPs의 개수가 증가함에 따라 상대적인 저감효과는 점차 줄어들며 최대 7.5%를 넘지 않는 것으로 분석되었다. 또한, 최적위치는 상대적으로 출구지점까지의 도달시간이 긴 HRUs에서 효과가 큰 것으로 분석되었으며, BMPs 설치 가능 HRUs와 전 유역의 CN을 일률적으로 저감하였을 경우에 비해 본 연구의 모형에 의해 선정된 BMPs의 효율성은 높은 것으로 분석되었다.

따라서 본 연구에서 개발된 침투기반의 수문모형을 이용

할 경우 유역 내 침투시설의 최적 위치 및 개수 결정에 유용하게 이용될 것으로 파악되었다.

## 사 사

본 연구는 소방방재청 자연재해저감기술개발사업(NEMA-06-NH-03-03) 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

건설교통부(2000). 1999년도 수자원 관리기법개발연구조사 보고서 : 지역적 설계 강우의 시간적 분포.

국가수자원관리종합정보시스템(2008). <http://www.wams.go.kr>.

윤용남, 김중훈, 유철상, 김상단(2002). 공간분포된 강우를 사용한 유출매개변수 추정 및 강우오차가 유출계산에 미치는 영향분석. 한국수자원학회논문집, **35**, pp. 1-12.

Abbott, M. B. and Refsgaard, J. C. (2002). *Distributed hydrological modeling*, Kluwer Academic, Boston.

Behera, P. K., Papa, F., and Adams, B. J. (1999). Optimization of regional storm-water management systems. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **1252**, pp. 107-114.

Beven, K. J. (2001). *Rainfall-runoff modeling: The primer*, Wiley, New York.

Chow, V. T., Maidment, D. R., and Mays, L. W. (1988) *Applied hydrology*, McGraw-Hill, New York.

Federal Aviation Agency (1970). *Advisory circular on airport drainage*. Rep., A/C 050-5320-5B, Washington, D.C.

Harrell, L. J. and Ranjithan, S. R. (2003). Detention pond design and land use planning for watershed management. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **1292**, pp. 98-106.

Mays, L. W. and Bedient, P. B. (1982). Model for optimal size and location of detention. *J. Water Resour. Plan. Manage. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, **1083**, pp. 270-285.

O' Callaghan, J. F. and Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage from digital elevation data. *Comput. Vis. Graph. Image Process.*, **28**, pp. 328-344.

Perez-Pedini, C. (2004). *Optimal location of BMPs for storm-water management*. MS thesis, Tufts Univ., Medford, Mass.

Perez-Pedini, C., Limbrunner, J. and Vogel, R. (2005). Optimal location of infiltration-based best management practices for storm water management. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **131**, pp. 441-448.

Sample, D. J., Heaney, J. P., Wright, L. T. and Koustas, R. (2001). Geographic information systems, decision support systems, and urban stormwater management. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **1273**, pp. 155-161.

Soil Conservation Service SCS. (1986). *Urban hydrology for small watersheds*. Technical Release 55, U.S. Dept. of Agriculture, Washington, D.C.

Yeh, C. H. and Labadie, J. W. (1997). Multiobjective watershed-level planning of storm-water detention basins. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **1236**, pp. 336-343.

Zhen, X. Y., Yu, S. L., and Lin, J. Y. (2004). Optimal location and sizing of stormwater basins at watershed scale. *J. Water Resour. Plan. Manage.*, **1304**, pp. 339-347.