

도시 물 순환 건전성을 위한 우수지와 침투기반 저류지의 복합설계기법

An Hybrid Approach for Designing Detention and Infiltration-based Retentions to Promote Sound Urban Hydrologic Cycle

최치현 · 최대규 · 이재관* · 김상단†

Chi Hyun Choi · Daegyoo Choi · Jae Kwan Lee* · Sangdan Kim †

부경대학교 환경공학과 · *국립환경과학원 낙동강물환경연구소

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University

*Nakdong River Water Environmental Research Center, National Institute of Environmental Research

(2010년 3월 19일 접수, 2011년 1월 11일 채택)

Abstract : This article proposes a hybrid approach involved in determining the size of stormwater control facilities as part of a very large scale urban retrofit project. The objective of the proposed hybrid approach is to restore the pre-development hydrologic cycle. Firstly, an appropriate IETD is determined to isolate single storm events from the continuous rainfall record. Then, using the NRCS-CN method, direct runoff and infiltration volume are computed for every storm events. Long-term statistics of direct runoff and infiltration volume are analyzed in each case of pre-development, post development, post development with detention only, and post-development with the proposed hybrid approach. In order to preserve long-term statistics of direct runoff and infiltration volume in the case of pre-development, the size of detention and infiltration-based retention are estimated using the genetic algorithm. The result shows that the proposed hybrid approach is very useful for restoring statistics of natural direct runoff and infiltration volume.

Key Words : Detention, Hydrologic Cycle, Infiltration-based Retention

요약 : 본 연구는 도시환경개선계획의 일환으로서 강우유출수 제어설비의 크기 결정과 관련된 복합 설계기법을 제안하고 있다. 제안된 복합설계기법의 목적은 도시 개발이전의 수문순환상태를 복원시키는 것에 있다. 먼저, 연속적인 강우기록으로부터 개개의 강우사상을 분리하기 위해 IETD를 결정한다. 그 다음에 NRCS-CN 방법을 적용하여 모든 강우사상에 대한 직접유출량과 침투량을 산정한다. 직접유출량과 침투량의 장기간 통계치는 개발이전, 개발이후, 개발이후 우수지 설계, 그리고 개발이후 제안된 복합설계의 경우에 대하여 각각 분석된다. 개발이전의 직접유출량과 침투량을 재현하기 위해서 유전자 알고리즘을 적용하여 우수지 및 침투기반 저류지의 크기가 산정된다. 제안된 복합설계기법은 자연 상태의 직접유출량과 침투량의 통계치를 재현하는데 매우 효과적인 것이 보여진다.

주제어 : 물 순환, 우수지, 침투기반 저류지

1. 서론

도시화에 따른 지형변화, 식생 및 토양의 변화, 불투수층 면적의 증가 등과 같은 유역의 수문학적 상태의 변화는 도시하천의 양적 질적 상태를 변경시킨다. 특히 주거지, 상업지 및 공업지의 개발 등에 따른 불투수층 면적의 증가는 유역의 지면보유량 및 침투량을 감소시켜 같은 기후상태에서도 보다 더 빈번한 지표면 유출을 발생시키게 되며, 건기 시 도시하천의 건천화를 초래하게 한다. 지금까지의 도시화로 인한 수문순환의 변화에 대한 대응은 장기적이고 연속적인 접근법을 취하기보다는 설계호우사상의 개념을 적용하여 왔다. 주로 홍수방어를 목적으로 개발된 이러한 설계호우사상에 따른 다양한 강우-유출 제어 관련 연구들은 당연히 도시화에 따른 홍수제어시스템에는 적절하게 적용될 수 있겠으나, 이를 직접적으로 평상시의 도시 물 순환 개선이라든가 비점오염원 관리 시스템에 적용하는 것에는 많은 무리가 따르게 된다.¹⁾ 이는 전체 강우사상 중에서 5% 미만의 강우사상만이 2년 빈도를 초과하며, 10년 빈도 강우량을

초과하는 경우는 1% 미만에 불과하다는 Guo and Urbanas의 연구만 보더라도 쉽게 짐작할 수 있다(Fig. 1).²⁾

따라서 도시화로 인한 수문순환의 변화를 완화시킬 목적으로 분산형 빗물관리(Decentralized Rainwater Management), 발생원 관리(Source Control) 등 다양한 대안들이 제안되어 왔다. 즉, 대부분의 대안들에서 궁극적으로 제어하고자 하는 수문변수들은 불투수층면적의 감소, 침투유량제어, 개발이전의 도달시간 유지, 지하수 재충진, 그리고 유출용적의 유지 등이다. 이 때, 중요한 접근방법 상의 변화는 단일설계호우사상을 선택하는 것이 아니라 고려하고자 하는 모든 기간의 주요 수문성분들을 고려한다는 것이다. 이에 따라 적용되는 수학적 모형 또한 단일호우사상을 모의하는 모형을 적용하는 것이 아니라, 전 기간의 수문성분들을 모의할 수 있는 연속적인 장기유출모의모형을 사용하게 된다.³⁻⁵⁾

이러한 추세에 따라 도시화에 따른 영향을 최소한으로 하면서 도시를 개발하고자 하는 개념으로 Low Impact Development (LID)가 많은 전문가들 사이에서 관심을 받고 있다. LID 기법은 미국의 PGDER (Prince George's County,

† Corresponding author E-mail: skim@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6529 Fax: 051-629-6510

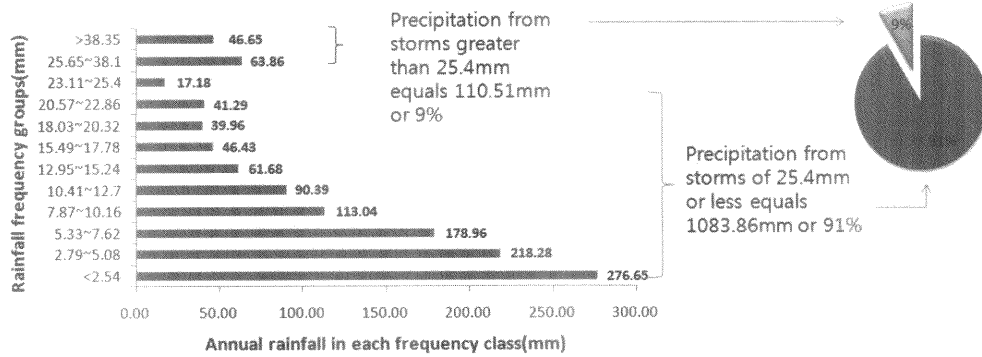


Fig. 1. Rainfall Frequency Distribution at Busan (1981 to 2008).

Maryland Department of Environmental Resources)에 의해 개발된 생태저류셀(bio-retention cell)이 Prince George's County 에 적용되면서 시작되었으며, 포틀랜드, 오리건 등의 많은 지자체에서 LID 기법을 도시자원보호 프로그램과 통합하여 적용하고 있다.⁶⁾ 국내에서는 몇몇 연구자에 의해서 LID에 대한연구가 수행되었는데 유역의 효율적인 관리를 위해서 불투수층에 대한 지표층을 개발하고 제안하면서⁷⁾ LID에 대하여 소개된 적이 있으며, 21세기 친환경 건설을 위한 LID 기술 도입이 제안되고 있다.⁸⁾

LID 기법을 물 순환 관리의 입장에서 정리해보면 새롭게 조성될 도시에 생태저류지를 포함한 침투기반의 저류지, 침투 트렌치, 옥상녹화, 식생수로 등과 같은 다양한 분산형 강우유출수 제어설비들을 설치하여 강우의 포착, 침투 및 증발산의 증진을 통하여 강우유출수의 양을 저감하고 건기 시 하천유량을 증가시키고자 하는 개념이라 할 수 있다. 다시 말해서 LID 개념의 강우유출수 수량관리는 가능한 자연 상태의 수문성분을 유지할 수 있도록 도시배수시스템을 설계하는 것을 의미한다.⁹⁻¹¹⁾

여기서 한 가지 제기되는 문제는 우리가 설계 목표로 고려해야할 자연 상태의 수문성분은 무엇인가에 관한 사항이

될 것이다. 이에 관한 여러 가지 토론이 있을 수 있겠으나, 자연 상태의 수문성분 구성비의 복원을 통해 자연 상태의 수문순환상태의 복원하는 것이 그 중 하나가 될 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 개발이전 및 이후의 연간 직접 유출량 및 침투량을 평가해 보고자 하였다. 강우-유출 모형으로는 NRCS-CN 방법을 적용하였으며, 기존의 단일설계 호우사상에 의한 우수지 설계의 경우와 우수지-침투기반 저류지 복합설계의 경우를 비교함으로써 도시 개발이전의 수문성분과 개발이후의 수문성분을 일치시키기 위한 강우유출수 제어설비의 개략적인 크기를 결정할 수 있는 기법을 제공하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. IETD (InterEvent Time Definition)

장기간의 강우자료를 살펴보면 수많은 0값(즉, 무강우기록)들이 존재하며, 이는 연속적으로 또는 불연속적으로 강우기록(0이 아닌 값)이 있음을 의미한다. 이러한 연속적인 또는 불연속적인 강우기록으로부터 각각의 개별적인 강우

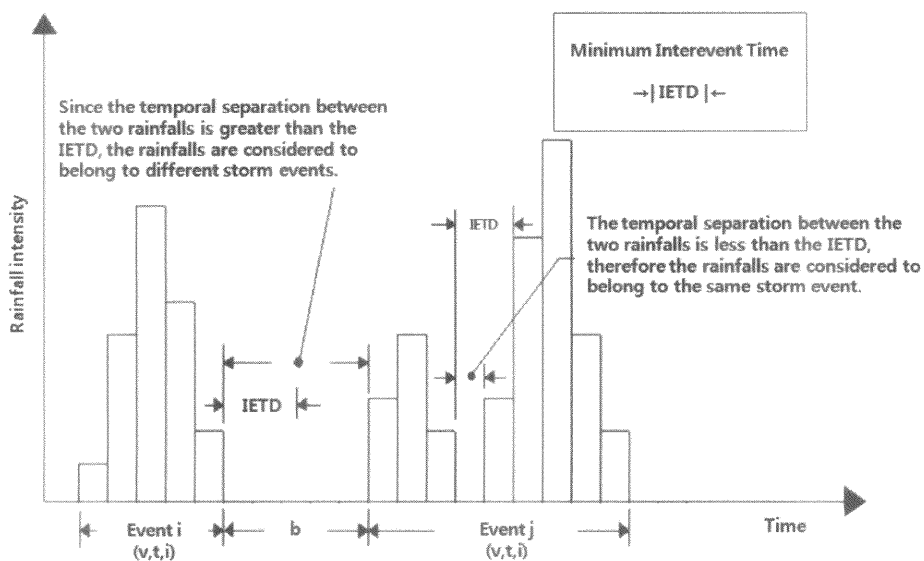


Fig. 2. Definition of IETD.

사상을 분리하기 위해서는 각 강우사상의 시작과 끝을 구별할 수 있는 기준이 필요하게 되는데, IETD (InterEvent Time Definition)가 이러한 기준으로써 비교적 손쉽게 적용 가능하다. IETD란 장기간의 강우자료로부터 각각의 강우사상을 분리하는 최소한의 무강우시간으로 정의될 수 있다. 즉, 강우기록 사이의 무강우시간이 IETD보다 짧으면 무강우시간 전과 후의 두 개의 강우기록들은 하나의 강우사상으로 간주되며, 반대로 무강우시간이 IETD보다 길 경우 무강우시간 전과 후의 두 개의 강우기록들은 각각의 개별적인 강우사상이 된다(Fig. 2).

IETD를 결정하기 위해서 자기상관계수 분석법, 변동계수 분석법, 연평균 강우발생 빈도분석법 등이 제안되어 왔다.¹²⁾ 본 연구에서는 이들 방법 중 전문가적 지식 없이도 비교적 객관적으로 IETD를 결정할 수 있는 방법인 변동계수 분석법을 통하여 IETD를 산정하고자 하였다. 변동계수 C_v 는 자료의 표준편차를 평균으로 나눈 값을 의미한다. 무강우시간의 확률분포는 대략적으로 지수분포를 따른다는 사실에 착안하여, 본 연구에서는 무강우시간들의 평균과 표준편차가 같아지는 시점, 즉 IETD를 변경시켜가면서 무강우시간의 변동계수가 1이 되는 결과를 주는 IETD를 찾아나가는 방법을 취하였다.

2.2. NRCS-CN 유출분석

유역에 동일한 강우가 내릴 경우 선행강우가 많다면 토양이 함유하고 있는 수분이 많으므로 침투가 감소하여 유출율이 높아지게 된다. 반대로 선행강우가 적거나 없을 경우 토양은 건조한 상태가 되어 침투율이 높아 유출율이 감소하게 된다. 이처럼 총강우량과 유효우량의 분석에 있어 선행강우는 중요한 요소로 작용하며 NRCS방법에서는 5일 선행강우를 적용한다. NRCS방법의 선행토양함수조건(Antecedent soil Moisture Condition, AMC)을 Table 1과 같이 세 가지로 구분하고 1년을 성수기(growing season)와 비성수기(dormant season)로 구분하여 5일 선행강수량의 크기에 따라 결정하고 있다. NRCS-CN 방법에서는 총 우량 중에서 유효우량에 영향을 미치는 토양의 종류 및 지표의 이용 상태를 고려하여 유출곡선지수 CN (Curve Number)을 결정한 후 유효우량을 산정하고 있다. 여기서 CN은 토양도 및 토지이용도를 이용하여 산정가능하다. 참고로 토양도 및 토지이용도 관련 GIS 자료는 국가수자원관리종합정보시스템(www.wamis.go.kr)을 통하여 제공되고 있다.

토양도와 토지이용도 상태에 따라 결정된 유출곡선지수 CN값은 선행토양함수조건이 AMC-II이며, 유효우량을 산

정하기 위해서는 식 1 및 2를 이용하여 실제 상황에 해당하는 AMC에 맞도록 CN값을 조정해야 한다.

$$CN(I) = \frac{4.2CN(II)}{10 - 0.058CN(II)} \quad (1)$$

$$CN(III) = \frac{23CN(II)}{10 + 0.13CN(II)} \quad (2)$$

IETD에 따라 분리된 강우사상들은 각각에 대하여 상기 보정된 CN값을 적용하여 직접유출량을 아래와 같이 산정하게 된다.

$$R = 0, \quad \text{for } P < 0.2S$$

$$R = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}, \quad \text{for } P \geq 0.2S \quad (3)$$

여기서, P 는 강우량(mm), R 은 직접 유출고(mm), S 는 토양함수비로 아래와 같이 보정된 CN값으로부터 계산된다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

이 때, 침투량 I 은 $P - R$ 로서 계산된다.

2.3. 개발에 따른 유출분석

CN값은 어떤 지역의 토양도와 토지이용도의 함수이므로, 도시화가 진행될수록 특별한 대책을 수립하지 않는다면 CN값은 점점 증가하게 된다. 즉, 연속적인 강우사상별로 개발 이전의 CN값에 따른 직접 유출량과 침투량을 계산할 수 있을 것이며, 개발이후의 CN값에 따른 직접유출량과 침투량을 계산할 수 있다.

만약 개발이후 우수지가 유역 출구에 설치된다면 아래와 같이 유출계산방법이 변경될 것이다.

$$R = 0, \quad \text{for } P < 0.2S_{post}$$

$$R = \max \left[\frac{(P - 0.2S_{post})^2}{P + 0.8S_{post}} - D_{D,eff}, 0 \right], \quad \text{for } P \geq 0.2S_{post} \quad (5)$$

여기서 S_{post} 는 개발이후의 CN값으로부터 계산되는 토양함수비이며, $D_{D,eff} = f_D \cdot D_D$, 즉 우수지에 의해 포착 가능한 강우량이다. f_D 는 전체배수분구면적에 대비 우수지가 설치된 면적의 비, D_D 는 실제 우수지의 깊이(mm)이다. 단, 이 경우 우수지에 집적된 강우유출수는 강우사상이 종료된 후에 방류되는 것으로 가정하였으며, 이는 강우에 따라 직접적으로 발생하는 유출이 아닌 것으로 간주하여 추후 직접 유출량의 연간 평균을 계산할 때 제외하였다. 그러나 유역 전체의 침투량의 경우 우수지 설치 유무와 전혀 관련이 없으므로 우수지가 없을 경우의 침투량 계산방법을 그대로 적용하여 연간 침투량을 산정하게 된다.

Table 1. Antecedent soil moisture conditions

AMC Group	Total 5days antecedent rainfall, P_5 (mm)	
	Growing Season	Dormant Season
I	$P_5 < 35.56$	$P_5 < 12.70$
II	$35.56 \leq P_5 < 53.34$	$12.70 \leq P_5 < 27.94$
III	$P_5 \geq 53.34$	$P_5 \geq 27.94$

만약 개발이후 침투기반 저류지가 유역 전반에 설치된다면 아래와 같이 유출계산방법이 변경될 것이다.

$$R_1 = 0, \quad \text{for } P < 0.2S_{post}$$

$$R_1 = \max \left[\frac{(P - 0.2S_{post})^2}{P + 0.8S_{post}} - R_{D,eff}, 0 \right], \quad \text{for } P \geq 0.2S_{post} \quad (6)$$

여기서 $R_{D,eff} = f \cdot (R_D - S_o)$, 즉 특정 강우사상이 발생하기 직전에 침투기반 저류지에 의해 포착 가능한 강우량이다. f 는 전체 배수분구면적에 대비 저류지가 설치된 면적의 비, R_D 는 실제 저류지의 깊이(mm), S_o 는 강우시작 직전 침투기반 저류지에 남아있는 물의 깊이(mm)를 의미한다. 즉, 침투기반 저류지의 경우 이전 강우사상에 의하여 저류된 물이 미처 저류지 바닥 등을 통하여 침투되지 못하고 남아있는 경우에는 다음 강우사상 발생 시에 저류지의 유효 깊이를 감소시키게 되는 경우가 발생하게 된다. 강우사상이 충분히 큰 경우, 즉 $(P - 0.2S_{post})^2 / (P + 0.8S_{post})$ 가 $R_{D,eff}$ 보다 큰 경우에는 침투기반 저류지의 용량을 모두 채우게 되며, 그렇지 못한 경우에는 침투기반 저류지의 일부가 채워지게 되고 이 경우 유출은 발생하지 않게 된다. 무강우기간 동안에 침투기반 저류지 내의 물은 침투 및 증발산 과정을 통하여 점차 감소되는데, 본 연구의 경우 일정 손실을 개념으로 이를 모의하였다.

유역 전체의 침투량의 경우 우수지 설치 시와는 다르게 침투기반 저류지 설치 시에는 침투가 증진되는 효과가 발생하게 된다. 본 연구의 경우 강우사상에 따른 침투량은 $P - R_1$ 으로 계산하였다.

침투기반 저류지 단독으로는 개발이후의 직접유출량을 개발이전으로 복원시킬 수 없을 경우 우수지가 유역 출구에 추가적으로 설치되어야 한다. 이 경우 직접 유출고는 아래와 같이 산정한다.

$$R = \max[R_1 - D_{D,eff}, 0] \quad (7)$$

2.4. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 1970년대에 Michigan 대학의 John Holland에 의하여 고안된 최적화 기법으로서 목적함수의 미분가능성이나 연속성에 의지하지 않고 함수값만을 이용하는 전역적인 확률탐색기법으로 여러 분야에 적용되어 그 효율성을 인정받고 있다.^{13,14)}

유전자 알고리즘의 원리는 다윈이 주장한 적자생존과 도태의 원리를 토대로 하여 정립된 최적화 알고리즘으로서, 설계영역에 다수의 설계점을 분포시킨 후, 적합도 함수값에 의하여 각 설계점의 적합도를 부여한다. 적합도가 높은 개체는 다음 단계에서 교배와 변이과정에 참여할 확률이 증가하며, 적합도가 높은 개체가 많이 형성될 경우, 유전자 알고리즘은 보다 개선된 방향으로 탐색을 수행한다. 적합도는 유전자 개체가 갖고 있는 특성을 나타내는 값으로서 이것은 환경에서 생존할 수 있는 즉, 적용할 수 있는 정도를

나타내는 값이다. 개체가 주어진 어떤 환경에서 생존하기 위해서는 최적의 적합도를 가져야 하며, 이러한 최적값은 일반적인 최적화 문제의 목적함수에서와 같이 목적함수인 적합도 함수를 설정하여 이것을 최적화함으로써 최적의 적합도를 구한다. 그러나 주어진 특정한 값을 갖는 염색체가 원하는 수준의 적합도를 충족시키지 못하면 유전자 변형을 통하여 염색체를 변화시켜 최적 적합도가 생성될 때까지 반복한다. 유전자 알고리즘은 적합도 함수 값만을 이용하여 전역탐색을 수행한다는 점 때문에 다양한 분야에 적용되어 그 실용성을 인정받고 있다.¹⁵⁾

본 연구에서 유전자알고리즘은 Matlab 이용하여 적합도 함수 값이 0에 수렴하는 방향으로 구현되었다. 이때 적합도 함수는 다음과 같다.

$$F = \left(\frac{\overline{Rpre}}{\overline{RHYD}} - 1 \right)^2 + \left(\frac{\overline{IFpre}}{\overline{IFHYD}} - 1 \right)^2 \quad (8)$$

여기서, \overline{Rpre} 는 도시화 이전에 유역의 유출량 평균, \overline{RHYD} 는 도시화 이후에 복합설계기법이 적용된 유역의 유출량 평균, \overline{IFpre} 는 도시화 이전에 유역의 침투량 평균, \overline{IFHYD} 는 도시화 이후에 복합설계기법이 적용된 유역의 침투량 평균이다.

본 연구에서는 침투기반 저류지와 우수지의 복합 설계기법의 주요 설계인자인 저류지 설치면적비율(f), 저류지의 깊이(R_D), 우수지 설치면적비율(f_b), 우수지의 깊이(D_D)를 산정하는데 유전자 알고리즘을 적용하였다. 이때 저류지 설치면적비율(f), 저류지의 깊이(R_D), 우수지 설치면적비율(f_b), 우수지의 깊이(D_D)는 다음과 같은 경계조건을 가진다. f 는 '저류지가 최대 설치 가능한 유역의 비율/2'에서 '저류지가 최대 설치 가능한 유역의 비율', R_D 는 0에서 '저류지가 최대 저장할 수 있는 유출고(mm)', f_b 는 0에서 '우수지 최대 비율', D_D 는 0에서 '우수지 최대 깊이(mm)'이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. IETD 결정

본 연구에서는 IETD를 결정하기 위하여 변동계수 분석법을 이용하였다. 기상청 부산지점의 1981년부터 2008년까지 28년간 시간 강우량을 대상으로 IETD를 1시간부터 2시간, 3시간 점점 늘려가면서 강우사상을 분리한 후, IETD별 무강우시간의 평균과 표준편차를 각각 계산하였다. 그 결과 Fig. 3에 도시한 바와 같이 IETD가 증가할수록 무강우시간이 변동계수가 점점 1에 수렴함을 살펴볼 수 있었으며, 최종적으로 IETD = 24시간일 때, 거의 1에 가까운 변동계수 값을 얻을 수 있었다. 이에 따라 부산지점 강우자료의 IETD를 24시간으로 설정하여 각각의 강우사상을 분리하여 이후 분석을 수행하였다.

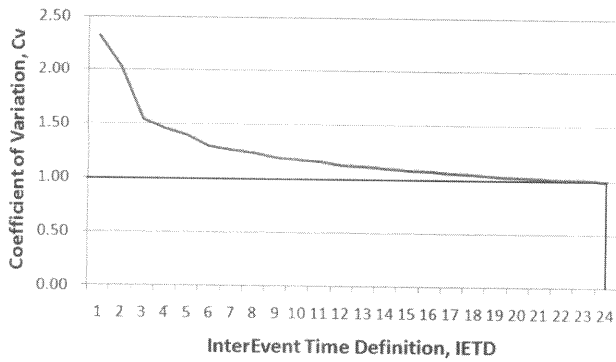


Fig. 3. Determination of IETD in Busan.

3.2. 개발이전 및 개발이후 유출 분석

부산지역의 28년간 강수량의 연평균강수량은 1194.4 mm/yr으로 산정되었다. 개발이전 및 이후의 평균 CN값을 결정하기위해서 온천천 지역 면적에서 산림지역의 영향을 최소화하고 도심지가 밀집된 고도 250 m 이하 배수분구를 통해 1975~2000년까지 5년 단위로 평균 CN값을 산정하였으며 이때 1975년과 2000년의 평균 CN값이 77, 84로 각각 산정되었다. 이를 근거로 대상 배수분구의 개발이전의 CN값은 75, 개발이후의 CN값은 85로 가정하여 이후 분석을 수행하였다. Fig. 4는 개발이전 상황을 나타내는 1975년과 개발이후 상황을 나타내는 2000년의 토지이용분포를 보여준다. 참고로 제시된 CN값은 CN-II값으로 각각의 강우사상에 대한 유출 계산 시 성수기/비성수기 조건 및 5일 선행강우조건에 따라 CN값이 보정되어 적용된다.

개발이전과 개발이후의 대상 배수분구의 연간 지표면 유출량과 침투량을 비교해 보면 연간 침투량은 개발이전에 996.5 mm/yr에서 개발이후 855.3 mm/yr로 141.2 mm/yr 감소한 것으로 계산되었으며, 이는 건기 시 하천유량 감소로 이어질 수 있음을 설명하고 있다. 반면에 연간 지표면 유출량은 개발이전에 197.9 mm/yr에서 개발이후 339.1 mm/yr으로 141.2 mm/yr 증가하였다. 즉, 도시개발에 따른 CN값 증가로 인하여 개발이전에는 침투되는 물의 일부가 지표면 유출량으로 전환된 것을 알 수 있다(Fig. 5 참조).

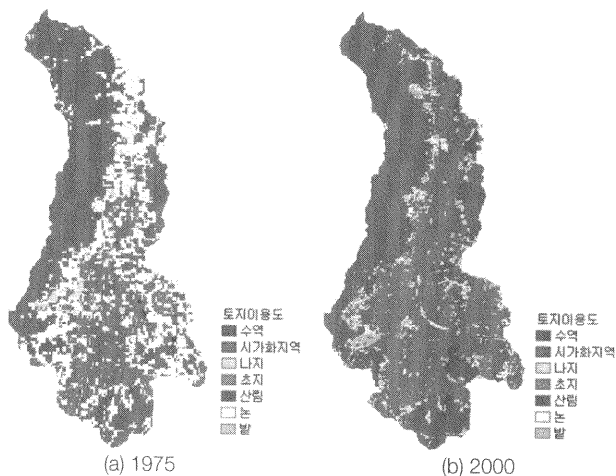


Fig. 4. Land use map in Oncheon stream area.

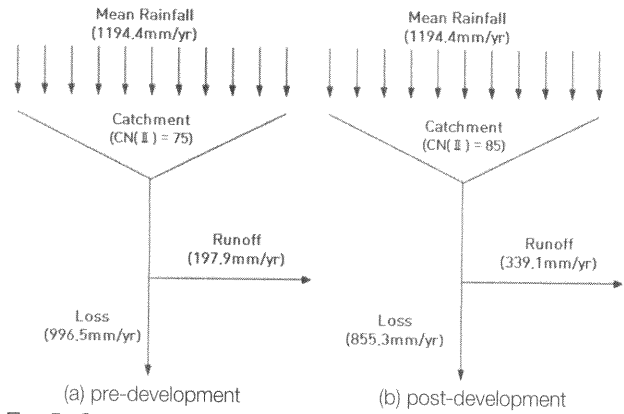


Fig. 5. Comparison of hydrologic components between pre- and post-development.

3.3. 강우유출수 제어설비 설계에 따른 유출 분석

기존의 단일설계호우사상에 기초한 방법인 우수지(detention)만을 설계할 경우에 대한 유출 분석을 우선 수행하였다. 우수지가 감당해야할 설계 유출량을 결정하기 위해서는 먼저 단일설계호우사상을 분석해야 한다. 대상 배수분구의 중요도에 따라서 적절한 강우지속시간(예를 들어, 2시간, 4시간, 8시간, 또는 그 이상)과 재현기간(예를 들어, 2, 10, 30년, 또는 그 이상)에 해당하는 단일설계호우사상을 선정하여 그러한 설계호우가 발생하였을 경우를 대상으로 개발이전과 개발이후의 순간 최대 유출량이 동일하도록 우수지를 설계하게 된다.

본 연구에서는 우수지 설계가 목적이 아니므로, 비교적 간단한 방법을 통하여 우수지를 설계하도록 하였다. 즉, 24시간 지속시간을 갖는 재현기간 2년에 해당하는 강수량을 설계 강수량으로 결정한 후, 이러한 강수량에 대하여 개발이전과 개발이후의 지표면 유출량을 일치시키기 위한 우수지를 설계하였다. 먼저 28년간의 시간강수량에서 매년 24시간 지속 강수량 중 최대 강수량 시계열을 추출하여 크기 순으로 나열하면 Fig. 6을 얻을 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 6에서 두 번째로 작은 강수량을 지속시간 24시간 재현기간 2년에 해당하는 설계강수량으로 간주하여 이후 분석을 수행하였다. 참고로 보다 정확히 설계호우사상을 결정하려면 빈도해석 또는 IDF 분석 등과 같은 보다 복잡한 절차가 요구됨을 밝혀둔다.

Fig. 6에 따르면 지속시간 24시간 재현기간 2년 강수량은 65.0 mm임을 확인할 수 있다. 이러한 설계강수량을 대상으로 개발이전과 이후의 지표면 유출량이 같아지도록 우수지를 설계하였다. 우수지의 실제 용량은 $f_D \cdot A \cdot D_D$ 로서, 여기서 A는 배수분구의 면적이다. 우수지 설계 시에는 배

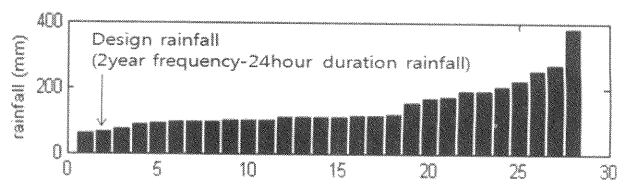


Fig. 6. Determination of design storm event.

Table 2. Mean and standard deviation of runoff and infiltration volume with detention only

	Annual surface flow (mm/yr)	Annual infiltrated water (mm/yr)	Standard deviation of event surface flow depth (mm)	Standard deviation of event infiltrated water depth (mm)
pre-development	197.9	996.5	16.1	24.7
post-development without project	339.1	855.3	21.7	18.9
post-development with detention only	217.0	855.3	19.0	18.9

수분구의 여건 상 일반적으로 우수지로 할당할 수 있는 장소가 한정되어 있기 때문에 유역면적대비 우수지의 면적비 f_D 는 0.05로 일정하게 설정하였다. 따라서 우수지의 깊이 D_D 가 추정해야할 설계 인자가 된다. 계산 결과 우수지의 깊이 D_D 가 275 mm일 경우에 개발이전과 이후의 지표면 유출량이 같아지는 것을 확인하였다. 개발이후에 $D_D = 275$ mm, $f_D = 0.05$ 의 우수지를 설계하여 장기간 강우사상에 따른 유출분석을 수행한 결과를 Table 2에 정리하였으며, 그에 따른 수문성분도를 Fig. 7에 도시하였다. 우수지의 경우에는 지표면 유출량의 순간적인 제어만 가능하므로 우수지의 설계 여부에 상관없이 침투량은 동일하게 된다(연평균 855.3 mm/yr). 지표면 유출량의 경우에도 단일한 설계호우사상에 대해서는 지표면 유출량을 일치시키도록 우수지가 설계되었으나, 장기간 연속 강우사상에 대한 분석 결과 개발 이전의 지표면 유출량보다 더 많은 유출량이 배출됨을 알 수 있다. 강우사상별 지표면 유출량 표준편차의 경우에도 우수지 설계 시 비록 다소 줄어들었다 할지라도 개발이전의 값보다 더 큰 표준편차를 보여주고 있으며, 이는 큰 강우사상이 발생할 때와 그렇지 않을 때의 유출량 편차가 개발이전보다 더 크게 벌어지고 있음을 의미한다. 개발이전에 비하여 개발이후 침투량 표준편차의 감소는 강우가 발생하였다 하더라도 침투가 일어나지 않을 확률이 더 크기 때문에 즉, 침투량이 0이 되는 경우가 더 많아졌기 때문에 발생하는 현상으로 분석되었다.

Fig. 8에 개발이전, 개발이후, 우수지가 설계된 개발이후에 대한 수문성분의 연별 변화도를 도시하였다. 지표면 유출량의 경우 우수지 설계로 인하여 개발이전의 지표면 유출

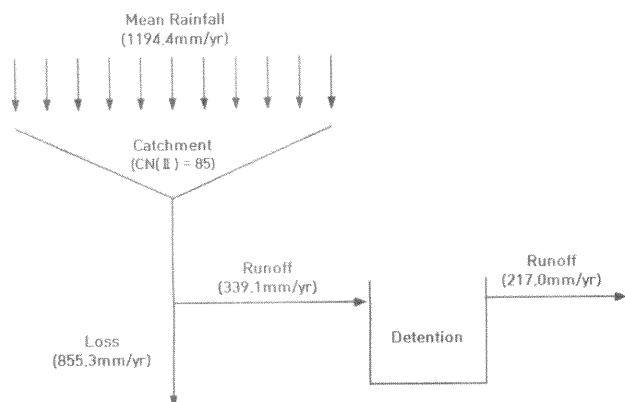


Fig. 7. Hydrologic components for post-development with detention only.

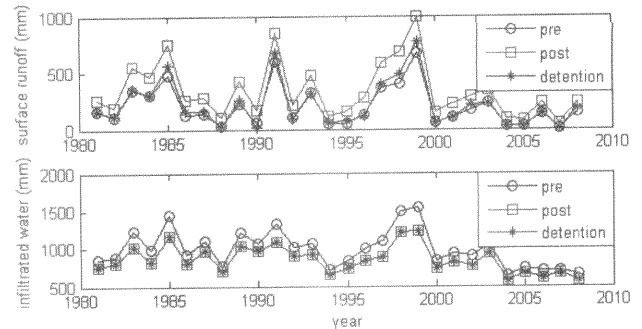


Fig. 8. Yearly hydrologic components derived by detention only.

량을 어느 정도 재현하고 있으나, 침투량의 경우에 있어서는 개발이전과 이후의 침투량이 같음이 확인할 수 있다. 따라서 우수지 설계만으로는 개발이전의 수문순환상태를 재현하기란 부족한 점이 많이 있음을 알 수 있다.

개발이후에 침투기반 저류지를 도입하고, 부족할 경우 우수지를 추가하는 복합설계의 경우는 저류지 설치면적비율 f , 저류지의 깊이 R_D , 우수지 설치면적비율 f_D , 우수지의 깊이 D_D 와 같은 매개변수들이 개발이전의 연간 유출량과 침투량의 평균을 모두 재현하는 방향으로 최적화하여 설계된다. 이에 덧붙여서 보다 우수한 수문순환상태의 재현을 위하여 강우사상 당 지표면 유출량과 침투량의 표준편차 또한 개발이전과 이후를 일치시키도록 최적화 프로그램(유전자 알고리즘)을 구현하였다. 이 때 R_D 는 0~150 mm, f_D 는 0~0.05, D_D 는 0~275 mm로 그 범위를 제한하였으며, f 의 최대 가능값 f_{max} 를 10%, 20%, 30%, 40%로 변경시켜가면서 최적 해를 찾는 과정을 반복하였다. f 값의 적용 가능 범위를 변경시켜가면서 분석한 이유는 침투기반 저류지의 경우 단순히 하나의 생태저류지가 될 수도 있고, 아니면 침투 트렌치, 옥상녹화, 식생수로 등과 같은 다양한 분산형 강우유출수 제어설비가 될 수도 있기 때문이다. 비교적 큰 면적이 소요될 수 있는 생태저류지의 경우 f_{max} 값에 다소 제한이 있을 수 있으며(예를 들어, 10% 내외), 침투트렌치 등과 같은 분산형 소규모 제어설비의 경우 상대적으로 큰 f_{max} 가

Table 3. Estimated parameters

	$f_{max} = 10\%$	$f_{max} = 20\%$	$f_{max} = 30\%$	$f_{max} = 40\%$
f (%)	9.88	19.91	28.94	34.11
R_D (mm)	146.5	149.8	146.9	114.7
f_D (%)	4.86	3.07	0.33	1.05
D_D (mm)	271.3	222.6	269.6	5.2

Table 4. Mean and standard deviation of runoff and infiltration volume with a hybrid approach

	Annual surface flow (mm/yr)	Annual infiltrated water (mm/yr)	Standard deviation of event surface flow depth (mm)	Standard deviation of event infiltrated water depth (mm)
$f_{max} = 10\%$	197,6	916,3	18,3	20,9
$f_{max} = 20\%$	198,2	960,9	18,3	22,7
$f_{max} = 30\%$	197,7	992,6	18,3	24,2
$f_{max} = 40\%$	197,8	996,3	18,3	24,3

적용가능하기 때문이다. f_{max} 의 값에 따라 최적화된 매개변수 값을 Table 3에 제공하였다.

추정된 매개변수를 토대로 하여 연속된 장기간 강우사상들에 대한 유출분석을 실시한 결과 f_{max} 에 상관없이 개발이전의 연간 지표수 유출량을 아주 잘 재현되고 있다(Fig. 9).

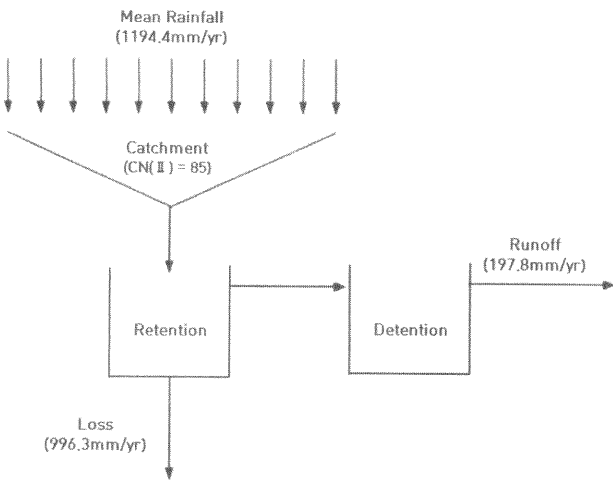


Fig. 9. Hydrologic components for post-development with a hybrid approach.

f_D 와 D_D 의 최적 값도 우수지만을 설계하였을 경우보다 작은 값이 도출되어 바람직한 방향의 설계가 되었음을 확인할 수 있으며, f_{max} 값이 증가할수록 우수지에 대한 의존도가 점점 낮아지는 경향을 보이고 있는 것도 살펴볼 수 있다. 연간 침투량의 경우 우수지만을 설계하였을 때보다 현저한 증가를 보이고 있어 개발이전의 수문순환상태를 복원시킬 가능성이 있음을 알 있다. 한 가지 추가적으로 언급할 사항은 f_{max} 를 40%로 설정한다 할지라도 최적화된 f 값은 34.11%로 이는 개발이전의 수문순환상태를 보다 완벽하게 재현시키기 위해 필요한 침투기반 저류지의 설치요구면적이라 볼 수 있다.

Table 4에 도출된 결과의 보다 상세한 수문성분 통계치를 수록하였다. 침투기반 저류지의 비중이 커질수록 개발이전의 침투량이 보다 잘 재현되고 있는 것을 살펴볼 수 있으며, 특히 강우사상별 침투량의 표준편차의 재현이 가능함에 따라서 개발에 따른 수문순환상태의 왜곡을 완화시켜 도시하천의 건천화를 방지하는데 중요한 역할을 수행할 것으로 기대된다.

개발이전의 수문순환상태의 재현 가능성은 Fig. 10을 통해서도 확인가능하다. Fig. 10은 개발이전, 개발이후, 우수지와 침투기반 저류지가 복합 설계된 개발이후에 대한 수문

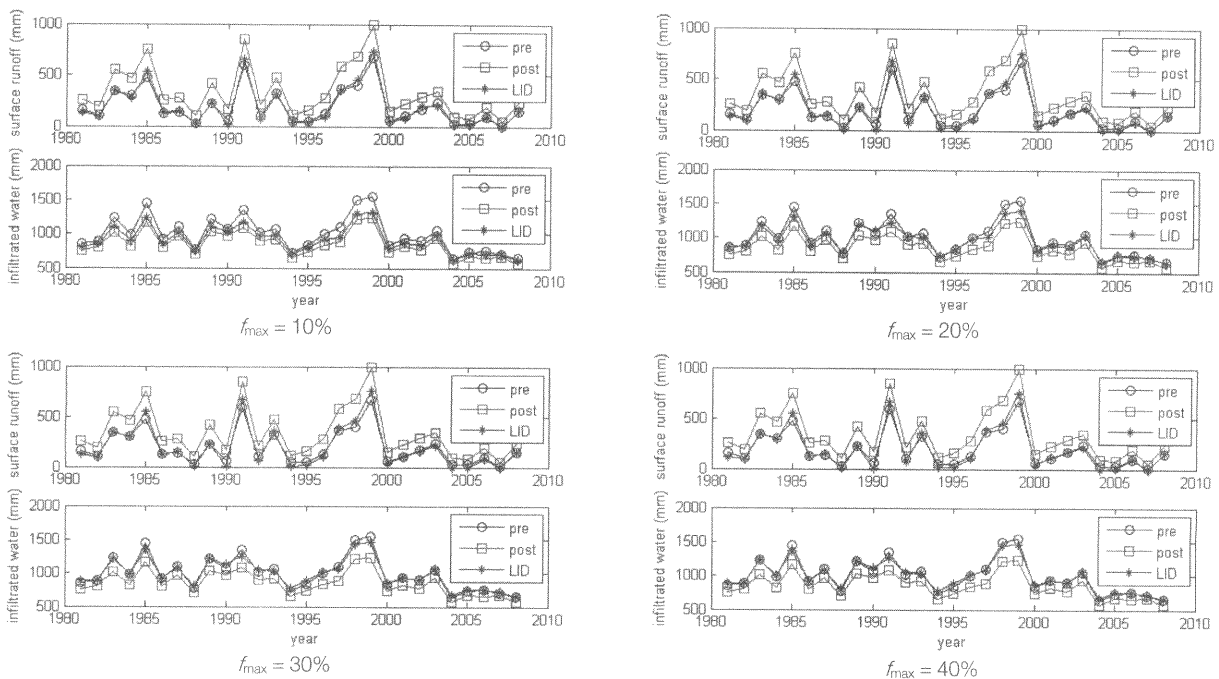


Fig. 10. Yearly hydrologic components derived by a hybrid approach.

성분의 연별 변화도를 보여주고 있다. 지표면 유출량의 경우 f_{max} 값이 증가할수록 개발이전의 지표면 유출량을 잘 재현하고 있으며, 침투량의 경우에도 매우 우수한 일치도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 개발이후의 수문순환상태를 수문성분 구성비의 복원을 통해 개발이전의 수문순환상태로 복원하기 위한 방안으로 우수지와 침투기반 저류지의 복합설계기법을 제안하였다. 이를 위하여 개발이전 및 이후의 연간 직접 유출량 및 침투량을 주요 복원 수문성분으로 선택하였다. 강우-유출 모형으로는 NRCS-CN 방법이 적용되었으며, 장기간의 강우사상에 대한 분석을 수행하기 위하여 IETD 개념을 도입하여 연속된 강우자료로부터 각각의 강우사상을 분리하여 적용하였다. 실제 적용을 위하여 기상청 부산지점 28년 연속 시간강우자료를 이용하였으며, 개발이전의 배수분구 CN값은 75, 개발이후 CN값은 85로 가정하여 분석을 수행하였다. 개발이전 및 개발이후, 그리고 개발이후 유역출구에 우수지를 단독으로 설계한 경우와 유역전반에 침투기반 저류지를 분산 설치하여 유역출구에 우수지를 설계한 경우(복합설계)를 비교 분석함으로써 제안된 기법의 적절성을 평가하였다. 복합설계의 경우 침투기반 저류지의 면적비 최대값을 10%, 20%, 30%, 40%로 변경하여 설계하였다. 이때 최적 설계값은 유전자 알고리즘을 이용하여 도출하였다.

분석결과 적절한 크기의 침투기반 저류지와 우수지가 동시에 설계될 경우 개발이후에도 개발이전의 연간 직접 유출량과 침투량을 잘 재현할 수 있었으며, 침투기반 저류지의 크기가 증가할수록 우수지에 대한 의존도가 점점 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 특히 우수지와 침투기반 저류지의 복합설계의 경우 강우사상별 수문성분의 평균값뿐만 아니라 침투량의 표준편차가 잘 재현됨을 확인하였다. 이 결과는 침투기반 저류지를 설치하면서 불투수층면적이 감소되며, 침투유량제어, 개발이전의 도달시간 유지, 지하수 재충진 및 유출용적의 유지 등을 제어하는 LID 개념과 일치한다. 또한 침투기반 저류지의 설치면적 비율을 조절하면서 유출량을 제어할 수 있는 장점이 있기 때문에 도시하천의 수문순환상태 개선과 건천화 방지를 위한 정책과 이에 따른 비용측면에서 효율적인 설계를 할 수 있을 것으로 기대된다.

사사

본 연구는 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0065511).

KSEE

참고문헌

1. Kim, S. and Han, S., "Urban Stormwater Capture Curve Using Three-Parameter Mixed Exponential Probability Density Function and NRCS Runoff Curve Number Method," *Water Environ. Res.*, **82**, 43~50(2010).
2. Guo, J. C. Y. and Urbanas. R. B., "Maximized detention volume determined by runoff capture ratio," *J. Water Resour. Planning and Manage.*, **122**, 33~39(1996).
3. Hammer, T., "Stream and Channel Enlargement due to Urbanization," *Water Res.*, **8**, 130~154(1972).
4. MacRae, C. R., "Experience from Morphological Research on Canadian Streams: Is Control of the Two-Year Frequency Runoff Event the Best Basis for Stream Channel Protection. Effects of Watershed Development and Management on Aquatic Ecosystems," *ASCE Engineering Foundation Conference, Snowbird, UT*, 144~162(1996).
5. Booth, D. and Jackson, R., "Urbanization of Aquatic Systems: Degradation Thresholds, Stormwater Detection, and the Limits of Mitigation," *J. Am. Water Res. Assoc.*, **33**(5), 1077~1090(1997).
6. Maine Department of Environment protection, Stormwater management for Maine: best Management practices, Maine Dept. of Environmental Protection Nonpoint Source Training and Resource Center(1995).
7. 최지용, "유역관리 효율화를 위한 불투수면 지표 개발과 적용," 한국환경정책평가연구원(2004).
8. 김이형, "21세기 친환경 건설을 위한 low impact development (LID) 기술," 한국수자원학회지, **41**(6), 47~57(2008).
9. Prince George's County, Low-impact development hydrologic analysis, Prince George's County, MD Department of Environmental Resources(1999a).
10. Prince George's County, Low-impact development design strategies: an integrated design approach, Prince George's County, MD Department of Environmental Resources(1999b).
11. 전지홍, 최동혁, 김태동, "지속가능한 도시개발을 위한 LID 평가모델(LIDMOD)개발과 수질오염총량제에 대한 적용성 평가," 한국물환경학회지, **25**(1), 230~238(2009).
12. Nix, S. J., Urban Stormwater Modeling and Simulation, Lewis Publishers, Boca Raton, FL(1994).
13. Holland, J. H., Adaptation in Natural and Artificial Systems, Univ. of Michigan Press, Ann Arbor, Mich(1975).
14. Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, New York, N.Y.(1989).
15. Gen, M. and R., Cheng., Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, N.Y.(1997).