유황곡선 보전을 위한 저류형 강우유출수 제어설비 설계

Design of Storage-based Stormwater Contol Facilities for Preserving Flow Druation Curve

최치현*, 김호성**, 김상단***

Chi Hyun Choi, Ho Sung Kim, Sangdan Kim

요 지

본 연구는 도시 개발이전의 유황곡선과 개발이후의 유황곡선을 일치시키기 위하여 강우유출수 제어설비의 크기 결정과 관련된 복합 설계기법을 제안하는데 있다. 우선 CN값을 산출 및 보정한 후, IETD에 따라 분할된 강우사상에 NRCS-CN 방법을 적용하여 직접유출량과 침투량을 산정한다. 직접유출량과 침투량의 장기적인 통계치는 개발이전, 개발이후, 개발이후 유수지 설계, 그리고 개발이후 제안된 복합설계의 경우에 대하여 각각 분석된다. 개발이전의 직접유출량과 침투량을 재현하기 위해서 유전자 알고리즘을 적용하여 유수지 및 저류지의 크기를 추정한다. 분석결과 복합설계 강우유출수 제어설비를 적용하였을 때 개발이전의 지표면 유출수와 침투수의 평균을 잘 재현하였고, 개발이전의 유황곡선이 개선될 여지가 충분히 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 강우유출수, 유수지, 유황곡선, 저류지

1. 서 론

도시화에 따른 유역의 수문학적 상태의 변화는 도시하천의 양적 질적 상태를 변경시킨다. 지금까지의 도시화로 인한 수문순환의 변화에 대한 대응은 장기적이고 연속적인 접근법을 취하기보다는 홍수방어를 목적으로 개발된 설계호우사상 개념으로 개발되어왔다. 이는 직접적으로 평상시의 도시 물 순환 개선이라든가 비점오염원 관리 시스템에 적용하는 것에는 많은 무리가 따르게 된다(Kim, S. and Han, S., 2010). 최근 이러한 추세에 따라 도시화에 따른 영향을 최소한으로 하면서 도시를 개발하고자 하는 개념으로 Low Impact development(LID)가 많은 전분가들 사이에서 관심을 받고 있다. LID 개념의 강우유출수 수량관리는 가능한 자연 상태의 수문성분을 유지 할 수 있도록 도시배수시스템을 설계하는 것을 의미한다(Prince George's Count., 1999a, 1999b; 전지홍 등, 2009). 본 연구에서는 개발이전 및 이후의 연간 직접유출량 및 침투량을 평가해 보고자 하였고, 도시 개발이전과 개발이후의 수문성분을 일치시키기 위한 강우유출수 제어 설비의 개략적인 크기를 결정 할 수 있는 기법을 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 IETD(InterEvent Time Definition)

IETD란 장기간의 강우자료로부터 각각의 강우 사상을 분리하는 최소한의 무강우시간으로 정의

* 정회원 부경대학교 환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : hihyuns01@naver.com
** 부경대학교 환경시스템공학부 석사과정 · E-mail : nijal209@nate.com
*** 정회원 부경대학교 환경시스템공학부 조교수 · E-mail : skim@pknu.ac.kr

될 수 있다. 본 연구에서는 변동계수 분석법을 통하여 IETD를 산정하고자 하였다. 변동계수(C_v)는 자료의 표준편차를 평균으로 나눈 값을 의미한다. 무강우시간의 확률분포는 대략적으로 지수분포를 따른다는 사실에 착안하여, 무강우시간들의 평균과 표준편차가 같아지는 시점을 찾아 변동계수가 1이 되는 IETD를 표준으로 한다.

2.2 일반적인 유출분석

NRCS-CN 방법에서는 유출곡선지수 CN(Curve Number)을 결정한 후 유효우량을 산정하고 있다. 여기서 CN은 토양도 및 토지이용도를 이용하여 산정가능하다. CN값을 결정(즉, CN-II)한 다음에 선행강우에 따라 값을 보정해 주어야 한다. NRCS-CN 방법에서는 5일 선행강우를 기준으로 CN값을 보정한다. IETD에 따라 분리된 강우사상들은 각각에 대하여 상기 보정된 CN값을 적용하여 직접유출량을 아래와 같이 산정하게 된다.

$$R = 0,\ \text{for}\ \ P < 0.2S \tag{1a}$$

$$R = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S},\ \text{for}\ \ P \geq 0.2S \tag{1b}$$

여기서, P는 강우량(mm), R은 직접 유출고(mm), S는 토양함수비로 아래와 같이 보정된 CN값으로부터 계산된다.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \tag{2}$$

이 때, 침투량 I은 $P-R$로서 계산된다.

2.3 개발에 따른 유출분석

연속적인 강우사상별로 개발이전의 CN값에 따른 직접 유출량과 침투량을 계산할 수 있을 것이며, 개발이후의 CN값에 따른 직접유출량과 침투량을 계산할 수 있다. 만약 개발이후 유수지가 유역 출구에 설치된다면 아래와 같이 유출계산방법이 변경될 것이다.

$$R = 0,\ \text{for} P < 0.2S_{post} \tag{3a}$$

$$R = \max\left[\frac{(P-0.2S_{post})^2}{P+0.8S_{post}} - D_{D,eff},\quad 0\right],\ \text{for}\ \ P \geq 0.2S_{post} \tag{3b}$$

여기서 S_{post}는 개발이후의 CN값으로부터 계산되는 토양함수비이며, $D_{D,eff} = f_D \cdot D_D$, 즉 유수지에 의해 포착 가능한 강우량이다. f_D는 전체배수분구면적에 대비 유수지가 설치된 면적의 비, D_D는 실제 유수지의 깊이(mm)이다. 만약 개발이후 침투기반 저류지가 유역 전반에 설치된다면 아래와 같이 유출계산방법이 변경될 것이다.

$$R_1 = 0,\ \text{for}\ \ P < 0.2S_{post} \tag{4a}$$

$$R_1 = \max\left[\frac{(P-0.2S_{post})^2}{P+0.8S_{post}} - R_{D,eff},\quad 0\right],\ \text{for}\ \ P \geq 0.2S_{post} \tag{4b}$$

여기서 $R_{D,eff} = f \cdot (R_D - S_o)$, 즉 특정 강우사상이 발생하기 직전에 침투기반 저류지에 의해 포착 가능한 강우량이다. f는 전체 배수분구면적에 대비 저류지가 설치된 면적의 비, R_D는 실제 저류지의 깊이(mm), S_o는 강우시작 직전 침투기반 저류지에 남아있는 물의 깊이(mm)를 의미한다. 무강우기간 동안에 침투기반 저류지 내의 물은 침투 및 증발산 과정을 통하여 점차 감소되는데, 본 연구의 경우 일정 손실율 개념으로 이를 모의하였다. 유역 전체의 침투량의 경우 유수지 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 유수지가 유역 출구에 추가적으로 설치되어야

한다. 이 경우 직접 유출고는 아래와 같이 산정한다.

$$R = \max[R_1 - D_{D,eff},\ \ 0] \tag{5}$$

2.4 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 1970년대에 Michigan 대학의 John Holland에 의하여 고안된 최적화 기법으로서 목적함수의 미분가능성이나 연속성에 의지하지 않고 함수값 만을 이용하는 전역적인 확률탐색기법으로 여러 분야에 적용되어 그 효율성을 인정받고 있다(Holland, J. H., 1975; Goldberg, D.E., 1989; Gen, M., and R., 1997). 본 연구에서는 유전자 알고리즘을 침투기반 저류지와 유수지의 복합 설계기법의 주요 설계인자인 저류지 설치면적비율(f), 저류지의 깊이(R_D), 유수지 설치면적비율(f_D), 유수지의 깊이(D_D)를 산정하는데 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 IETD 결정

IETD를 결정하기 위하여 변동계수 분석법을 이용하였다. 기상청 부산관측소의 1981년부터 2008년까지 28년간 시간 강우량을 대상으로 IETD를 1시간부터 시간간격으로 늘려가면서 강우사상을 분리한 후, IETD별 무강우시간의 평균과 표준편차를 각각 계산하였다. 계산결과 ITED가 24시간일 때, 거의 1에 가까운 변동계수 값을 얻을 수 있었다. 이에 따라 부산지점 강우자료의 IETD를 24시간으로 설정하여 각각의 강우사상을 분리하여 이후 분석을 수행하였다.

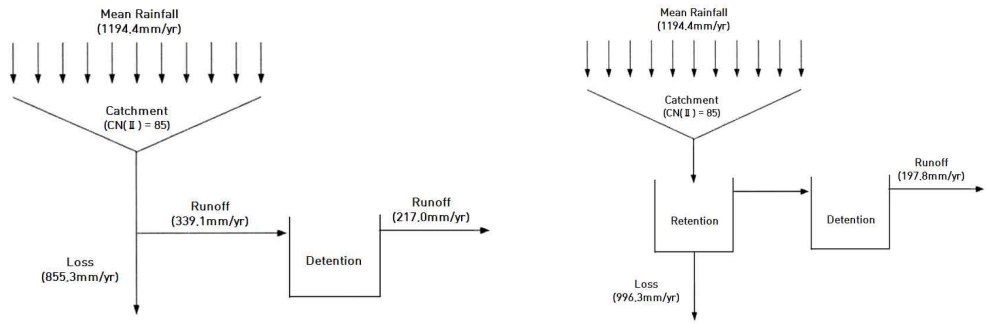
3.2 개발이전 및 개발이후 유출 분석

부산지역의 28년간 강수자료의 연평균강수량은 1194.4 mm/yr으로 산정되었다. 대상 배수분구의 개발이전의 CN값은 75, 개발이후의 CN값은 85로 가정하여 이후 분석을 수행하였다. 개발이전과 개발이후의 대상 배수분구의 연간 지표면 유출량과 침투량을 비교해 보면 연간 침투량은 개발이전에 996.5 mm/yr에서 개발이후 855.3 mm/yr로 연간 지표면 유출량은 개발이전에 197.9 mm/yr에서 개발이후 339.1 mm/yr으로 계산되었다.

3.3 강우유출수 제어설비 설계에 따른 유출 분석

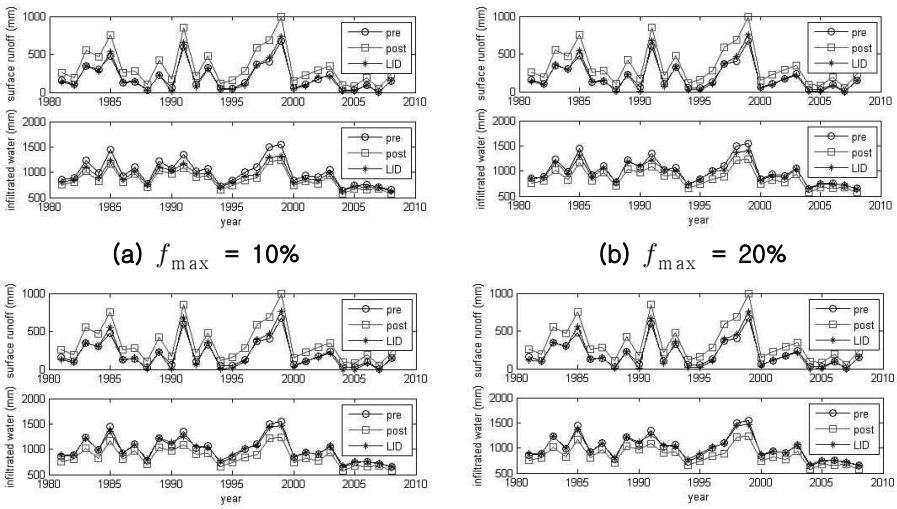
기존의 단일설계호우사상에 기초한 방법인 유수지(detention)만을 설계할 경우에 대한 유출 분석을 우선 수행하였다. 설계강우량을 24시간 지속시간 재현기간 2년으로 선정하여 개발이전과 이후의 지표면 유출량을 일치시키기 위한 유수지를 설계하였다. 설계강우량은 65.0mm으로 산정되었다. 유수지의 실제용량은 $f_D \cdot A \cdot D_D$로서, 여기서 A는 배수분구의 면적이고, 유역면적대비 유수지의 면적 비 f_D는 0.05로 일정하게 설정하였다. 따라서 유수지의 깊이 D_D는 275mm로 설계하였다. 유수지의 경우에는 지표면 유출량의 순간적인 제어만 가능하므로 유수지의 설계 여부에 상관없이 침투량은 동일하게 된다. 따라서 유수지의 설계만으로는 개발이전의 유황곡선을 재현하기란 부족한 점이 많이 있음을 확인 하였다. 개발이후에 침투기반 저류지를 도입하고, 부족할 경우 유수지를 추가하는 복합설계의 경우는 저류지 설치면적비율 f, 저류지의 깊이 R_D, 유수지 설치면적비율 f_D, 유수지의 깊이 D_D와 같은 매개변수들이 개발이전의 연간 유출량과 침투량의 평균을 일치하는 방향으로 그리고 유황곡선을 재현하기 위한 최적화 프로그램(유전자 알고리즘)을 통해 설계되었다. 이때 각각의 매개변수의 범위를 제한하였으며, f의 최대 가능값 $f_{\max}$를 10%, 20%, 30%, 40%로 변경시켜가면서 최적 해를 찾는 과정을 반복하였다. 추정된 매개변수를 토대로 강우사상들에 대한 유출분석을 실시한 결과 $f_{\max}$에 상관없이 개발 이전의 연간 지표수 유출량을 잘 재현하

고 있다. f_D와 D_D의 최적 값도 유수지만을 설계하였을 경우보다 작은 값이 도출되어 바람직한 방향의 설계가 되었음을 확인할 수 있으며, $f_{\max}$ 값이 증가할수록 유수지에 대한 의존도가 점점 낮아지는 경향을 보이고 있는 것도 살펴볼 수 있다. 또한 $f_{\max}$를 40%로 설정한다 할지라도 최적화된 f값은 34.11%로 이는 개발이전의 유황을 보다 완벽하게 재현시키기 위해 필요한 침투기반 저류지의 설치요구면적이라 볼 수 있다. 그리고 지표면 유출량의 경우 $f_{\max}$값이 증가할수록 개발이전의 지표면 유출량을 잘 재현하고 있으며, 침투량의 경우에도 매우 우수한 일치도를 보이고 있음을 확인할 수 있다.



(a) Detention only (b) Hybrid approach

그림 1. Hydrologic components for post-development with detention only and hybrid approach.



(a) $f_{\max}$ = 10% (b) $f_{\max}$ = 20%

(c) $f_{\max}$ = 30% (d) $f_{\max}$ = 40%

그림 2. Yearly hydrologic components derived by a hybrid approach.

표 1. 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

표 2. 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

4. 결 론

본 연구에서는 개발이후의 유황곡선을 개발이전의 유황곡선으로 복원하기위하여 유수지와 침투기반 저류지의 복합설계기법을 제안하였다. 분석결과 적절한 크기의 침투기반 저류지와 유수지가 동시에 설계될 경우 개발이후에도 개발이전의 연간 직접유출량과 침투량을 잘 재현할 수 있었으며, 특히 유수지와 침투기반 저류지의 동시 설계의 경우 강수사상별 수문성분의 평균값뿐만 아니라 침투량의 표준편차가 잘 재현됨을 확임함에 따라 도시개발에 의해 왜곡된 도시하천의 유황개선과 건천화 방지를 위해 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 전지홍, 최동혁, 김태동(2009). 지속가능한 도시개발을 위한 LID평가모델(LIDMOD)개발과 수질오염총량제에 대한 적용성 평가, 한국물환경학회지, 제25권 제1호, pp. 230-238.
2. Gen, M., and R., Cheng. (1997) Genetic Algorithms and Engineering Design, John Wiley & Sons, New York, N.Y.
3. Goldberg, D.E. (1989) Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley, New York, N.Y.
4. Holland, J. H. (1975) Adaptation in Natural and Artificial Systems, Univ. of Michgan Press, Ann Arbor, Mich.
5. Kim, S. and Han, S. (2010) Urban Stormwater Capture Curve Using Three-Parameter Mixed Exponential Probability Density Function and NRCS Runoff Curve Number Method, Water Environment Research, Vol. 82, pp.43-50.
6. Prince George's County. (1999a) Low-impact development hydrologic analysis, Prince George's County, MD Department of Environmental Resources.
7. Prince George's County. (1999b) Low-impact development design strategies: an integrated design apporach, Prince George's County, MD Department of Environmental Resources.