

도시 소유역 유효불투수율의 민감도 분석

Sensitivity analysis of effective imperviousness estimation for small urban watersheds

김대근^{1*} · 고영찬²

Kim, Dae Geun^{1*} · Ko, Young Chan²

1 목포대학교 공과대학 건설공학부 토목공학전공, 2 초당대학교 건설정보공학과

(2008년 9월 26일 접수 ; 2009년 2월 17일 수정 ; 2009년 2월 25일 채택)

Abstract

In this study, a runoff hydrograph and runoff volume were calculated by using the kinematic wave theory for small urban watersheds based on the concept of low impact development(LID), and the effective imperviousness was estimated based on these calculations. The degree of sensitivity of the effective imperviousness of small watersheds to the impervious to pervious area ratio, infiltration capability, watershed slope, roughness coefficient and surface storage depth was then analyzed. From this analysis, the following conclusions were obtained: The effective imperviousness and paved area reduction factor decreased as the infiltration capability of pervious area increased. As the slope of watersheds becomes sharper, the effective imperviousness and the paved area reduction factor display an increasing trend. As the roughness coefficient of impervious areas increases, the effective imperviousness and the paved area reduction factor tend to increase. As the storage depth increases, the effective imperviousness and the paved area reduction factor show an upward trend, but the increase is minimal. Under the conditions of this study, it was found that the effective imperviousness is most sensitive to watershed slope, followed by infiltration capability and roughness coefficient, which affect the sensitivity of the effective imperviousness at a similar level, and the storage depth was found to have little influence on the effective imperviousness.

Key words : LID, runoff, kinematic wave theory, effective imperviousness, paved area reduction factor

주 제 어 : LID, 유출, 운동파이론, 유효불투수율, 불투수율감소계수

1. 서 론

도시화에 따른 유역의 불투수율 증대는 홍수의 침투유량과 유출용적을 증대시키며 홍수의 도달시간을 단축시키는 원인이 된다. 아울러 유역의 불투수율 증대는 강우시 도심지

비점오염원에서 배출되는 오염부하량을 증대시켜 공공수역의 수질을 저하시키는 주요 원인으로 작용한다(김대근과 박선중, 2008; 이두진 등, 2004; Guo and Urbonas, 2004 USEPA, 1983).

도시에서의 홍수관리를 위해서는 다양한 구조적 비구조

* Corresponding author Tel:+82-61-450-2476, Fax:+82-61-452-6468, E-mail: kdg05i@mokpo.ac.kr(Kim, D.G.)

적 대책이 있으나, 그 중 불투수구역에서 발생하는 우수 유출이 하수관거 및 공공수역으로 직결되는 비율을 최소화하는 방안(low impact development, LID)이 하나의 대안으로 제시되고 있다(UDFCD, 2001). LID를 위해서는 첫째 유역의 불투수유역을 감소시키고, 둘째 불투수구역에서 발생한 우수를 하수관거 및 공공수역에 직결하지 않고 운동장, 공원, 초지 등과 같은 투수유역을 거쳐 유출되도록 하는 것이 필요하다. 이를 통해 토양을 통한 침투를 증대시킴으로써 홍수피의 도달시간을 지체시킬수 있으며 유출용적을 줄일 수 있다.

도심지 소유역에서 유출량을 산정할 때 중요한 유역에 관한 입력인자 중 하나가 유역의 불투수율이다. 합리식에서 유역의 유출계수, 대표적인 도시유출 모형인 SWMM에서 유역의 불투수율을 산정할 때, 일반적으로 면적가중평균법(area-weighted method)을 사용하고 있으며 이를 유역의 대푯값으로 하여 유출량을 계산한다(Huber and Dickinson, 1992). 하지만 이러한 방법으로는 불투수구역에서 투수유역을 거쳐 하수관거에 유출되는 흐름과정을 반영한 유출 해석은 불가능하다. 즉, 전통적인 면적가중평균법으로 유역의 불투수율을 산정하여 일괄적으로 소유역의 유출량을 산정하는 방법은 LID를 기본으로 개발된 소유역에는 적용이 어려운 것이다. 이를 해석하기 위해서는 해당 소유역을 상류 불투수유역과 하류 투수유역의 2개의 소유역으로 분류하여 불투수유역의 유출수문곡선을 산정하고, 이를 투수유역의 유입수문곡선으로 하여 투수유역의 유출수문곡선과 합성하는 절차를 거쳐야 한다. Guo(2008)는 LID를 기본으로 개발된 소유역에 대해 면적가중평균불투수율(area-weighted imperviousness) 대신, 유효불투수율(effective imperviousness)의 개념을 도입하여 소유역을 불투수유역과 투수유역으로 구분하지 않고 일괄적으로 유출수문곡선을 산정하는 방법을 제시하였다. 유출해석을 위한 지배방정식은 운동파이론(kinematic wave theory)을 기본으로 하였으며, 투수유역에 대한 불투수유역의 면적비, 투수유역의 침투능에 따른 유효불투수율의 변화를 검토하였다. 하지만 유출수문곡선에 영향을 미치는 인자로는 이외에도 유역의 경사, 조도계수, 지표면의 저류깊이 등이 있는데, 이들이 유효불투수율에 미치는 영향은 검토가 이루어지지 않았다.

본 연구에서는 LID기반으로 개발된 도시 소유역의 지표면유출을 해석하기 위한 지배방정식으로 운동파이론을 이용하였으며, 지표면저류 효과까지 고려할 수 있도록 하였다. 그리고 LID를 기본으로 개발된 소유역에 대해 유출수문곡선을 산정하고 이를 이용하여 Guo(2008)가 제시한 유효불투수율을 추정하였다. 불투수유역의 면적비, 침투능, 유역의

경사, 조도계수, 지표면의 저류깊이가 소유역의 유효불투수율에 미치는 민감도를 분석하였다.

2. 연구방법

LID를 기본으로 개발된 소유역은 상류 불투수유역과 하류 투수유역의 2개의 연속소유역(cascading subbasin)으로 분류할 수 있다(Fig. 1(a) 참조). 연속소유역모델에서는 불투수유역의 유출수문곡선, q_{im} 을 먼저 산정하고, 이를 투수유역의 유입수문곡선으로 하여 투수유역의 유출수문곡선, q_p 와 합성하여 최종 유출수문곡선, q_T 를 산정할 수 있다. Fig. 1(b)는 중앙수로모델로, Fig. 1(a)의 연속소유역모델의 유역길이(basin length)와 동일한 유역길이를 가지는 투수유역과 불투수유역으로 구분된다(Guo, 2008).

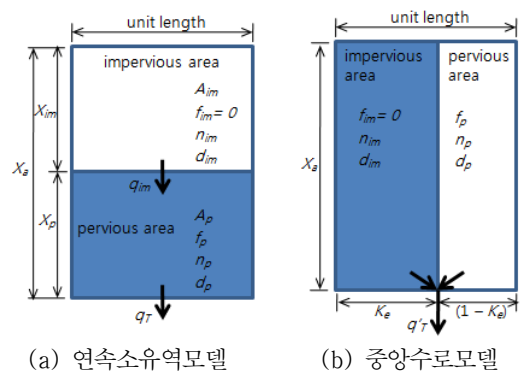


Fig. 1. 연속소유역모델과 중앙수로모델의 개념도(Guo (2008) 보원)

소유역의 단위폭당 지표면유출을 해석하기 위한 지배방정식으로 마찰경사는 유역경사와 같다고 가정했을 때의 운동파이론은 다음과 같다(Huber and Dickinson, 1992).

$$\frac{dV}{dt} = XI_e - q \quad (1a)$$

$$I_e = I - f + \frac{q_{im}}{X} \quad (1b)$$

$$V = Xd \quad (1c)$$

$$q = \frac{1}{n} (d - d_o)^{5/3} \sqrt{S_o} \quad (1d)$$

위에서 V 는 유역의 단위폭당 저류용적, I 와 I_e 는 각각 강우강도와 유효강우강도, q 는 단위폭당 유출량, q_{im} 은 연속소유역모델의 불투수유역에서 발생하는 단위폭당 유출량, f 는 침투능, d 와 d_o 는 각각 소유역의 수심과 지표면저류로 인한

저류깊이, n 은 Manning의 조도계수, S_o 는 유역의 경사, X 는 유역길이, t 는 시간이다. 연속소유역모델에서 불투수유역의 유출을 계산할 때 식 (1b)의 f 와 q_{im} 은 모든 시간대에서 0가 되고, 투수유역의 유출을 계산할 때 q_{im} 은 불투수유역에서 발생한 유출수문곡선을 입력하게 된다. 중앙수로모델에서는 식 (1b)의 q_{im} 은 항상 0이다.

식 (1)의 미분방정식을 해석하기 위한 가장 기본적인 유한차분법으로 양해법(explicit method)을 이용하면 식 (1a)의 유한차분식은 다음과 같다.

$$d(t+\Delta t) = d(t) + \Delta t \left(I_e(t) - \frac{q(t)}{X} \right) \quad (2)$$

위에서 Δt 는 시간증분으로 본 연구에서는 0.01시간을 사용하였다. 식 (2)에서 수심을 구하면 식 (1d)를 이용하여 유출량을 산정할 수 있다.

연속소유역모델(Fig. 1(a))에서는 불투수유역의 q_{im} 을 구하고, 연속하여 q_T 를 구하면 소유역의 유출수문곡선을 얻을 수 있으며, 여기서 구한 유출수문곡선을 적분하면 연속소유역모델에 대한 다음과 같은 단위폭당유출용적(total unit-width runoff volume), V_T 을 산정할 수 있다.

$$V_T = \int_0^{T_B} q_T(t) dt \quad (3)$$

위에서 T_B 는 유출수문곡선의 기저시간(base time)이다.

Fig. 1(a)와 같은 소유역을 Fig. 1(b)와 같이 동일한 유역길이를 가지는 불투수유역과 투수유역의 경계를 기준으로 구분하여 이를 중앙수로모델이라 하면, 동일한 강우가 투수유역과 불투수유역에 발생했을 때, 각 소유역에서는 서로 독립적인 유출이 발생한다. 소유역 출구에서의 유출수문곡선은 이 둘 불투수유역과 투수유역에서 발생한 각각의 유출수문곡선을 합성하면 된다. 단 수문곡선의 합성을 위해서는 유효불투수율, K_e 의 산정이 필요하다. 중앙수로모델의 단위폭당 유출용적, V_T' 은 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$V_T' = K_e V_{im}' + (1 - K_e) V_p' \quad (4)$$

위에서 V_{im}' 과 V_p' 는 각각 불투수유역과 투수유역에서 발생하는 단위폭당 유출수문곡선의 유출용적으로, 단위폭당 유출수문곡선은 식 (1)과 (2)를 불투수유역과 투수유역에 각각 적용하여 산정할 수 있다. 유효불투수율은 식 (3)과 (4)에서 산정한 단위폭당 유출용적이 같다고 하여 산정하면 다

음과 같다(Guo, 2008).

$$K_e = \frac{V_T - V_p'}{V_{im}' - V_p'} \quad (5)$$

한편, 전통적인 강우-유출관계에서 사용하는 면적가중평균 불투수율, K_a 는 다음과 같다.

$$K_a = \frac{A_{im}}{A_{im} + A_p} = \frac{A_r}{1 + A_r} \quad (6)$$

위에서 A_{im} , A_p 는 각각 Fig. 1(a)의 불투수유역과 투수유역의 면적이며, A_r 은 투수유역에 대한 불투수유역의 면적비이다. 유효불투수율과 면적가중평균불투수율의 관계를 설명하는 불투수율감소계수(paved area reduction factor), k_R 은 다음과 같다.

$$K_e = k_R K_a \quad (7)$$

LID 기반으로 개발된 소유역의 유출현상에 영향을 미치는 침투능, 강우강도, 불투수면적비, 지면경사, 조도계수, 지표면저류 등과 같은 영향인자에 대해, 유효불투수율과 면적가중평균불투수율의 상호관계를 파악할 수 있다면(즉, 불투수율감소계수를 파악할 수 있다면), 소유역의 면적비를 이용하여 손쉽게 면적가중평균불투수율을 계산하고 이를 이용하여 유효불투수율을 계산할 수 있다. 즉, 이러한 방법으로 손쉽게 LID 기반으로 조성된 소유역의 유출용적을 추정할 수 있다.

유출에 영향을 미치는 영향인자에 따른 불투수율감소계수의 민감도를 평가하기 위하여 Table 1과 같은 모의조건을 설정하였다. 강우강도는 목포지역의 1시간 지속시간을 가지는 30년빈도의 강우강도에 해당하는 54mm/hr.를 기준으로 하였으며(건설교통부, 2000), 불투수유역의 조도계수와 저류깊이는 콘크리트 포장을 기준으로 0.015와 0.2mm를 사용하였다.

3. 연구결과

Fig. 2는 Table 1의 기준값에 대하여 산정한 유출수문곡선이다. 여기서 q_T 는 연속소유역모델의 유출수문곡선으로 이를 적분하여 V_T 를 산정할 수 있다. q_{im} 과 q_p 는 중앙수로모델의 불투수유역과 투수유역에 대한 단위폭당 유출수문곡선으로 이를 적분하여 식 (5)의 V_{im}' 과 V_p' 을 계산할 수 있

Table 1. 모의조건

영향인자	모의범위	기준값	비고
$A_r = \frac{A_{im}}{A_p} = \frac{X_{im}}{X_p}$	0.25 ~ 4.0	1	X_p : 100m
$\frac{f_p}{I}$	0.1 ~ 0.9	0.5	I : 54mm/hr.
$\frac{n_p}{n_{im}}$	2 ~ 10	6	n_{im} : 0.015
$\frac{d_p}{d_{im}}$	2 ~ 10	6	d_{im} : 0.2mm
S	0.1 ~ 0.001	0.01	

으며 이를 이용하면 식 (5)의 유효불투수율을 산정할 수 있다. 이 경우 면적가중평균불투수율은 0.5이며, 유효불투수율은 0.43이므로 불투수율감소계수는 0.86이 된다. 여기서 산정한 유효불투수율을 이용하여 중앙수로모델의 유출수문곡선을 산정한 것이 q_T' 이다. 즉, q_T 와 q_T' 의 유출용적은 서로 동일하나 수문곡선의 첨두유량의 크기나 시간이력은 다소 차이가 있음을 알 수 있다.

식 (2)의 시간증분, Δt 에 따른 계산결과의 변동성을 검토하기 위하여 Table 2의 기준값에 대하여 Δt 의 변화에 따른 유효불투수율의 변동양상을 살펴보았다(Fig. 3 참조). 0.01 시간보다 작은 Δt 에서는 유효불투수율의 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 이후 모든 모의조건에 대하여 Δt 는 모두 0.01시간을 사용하였다.

Fig. 4는 강우강도에 대한 투수유역 토양의 침투능비(이

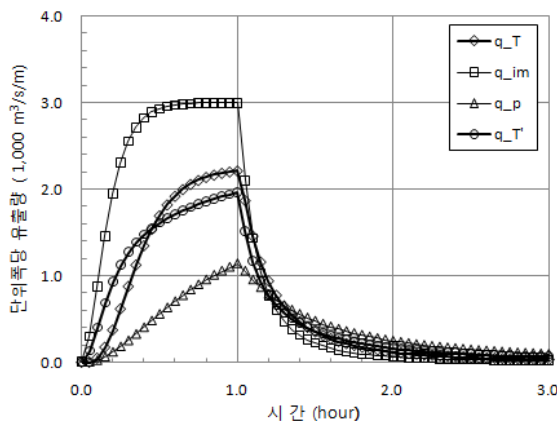


Fig. 2. 모델에 따른 유출수문곡선 결과 ($\Delta t = 0.01$ 시간)

하 침투능비)에 따른 유효불투수율과 불투수율감소계수의 민감도를 도시한 것이다. 침투능비가 증가함에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 감소하는 경향을 보인다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 면적가중평균불투수율은 50%인데, 유효불투수율은 44.1%에서 47.9%의 범위를 보이고 있으며, 불투수율감소계수는 88.2%에서 95.9%의 범위를 가진다. 즉, 면적가중평균불투수율을 이용하는 유출해석에 비해 연속소유역모델을 이용하는 유출해석의 결과가 유출용적과 첨두유량을 감소시키는 결과를 보이게 된다.

Fig. 5는 유역경사에 따른 유효불투수율과 불투수율감소계수의 민감도를 도시한 것이다. 유역경사가 급해짐에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 증가하는 경향을 보인다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 유효불투수율은 40.0%에서 46.1%의 범위를 보이고 있으며, 불투수율감소계수는 79.9%에서 92.3%의 범위를 가진다.

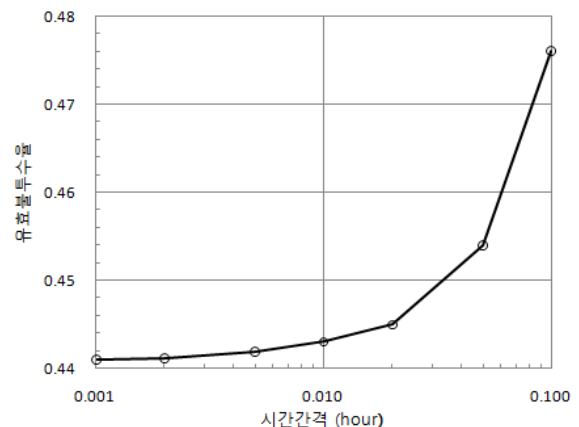
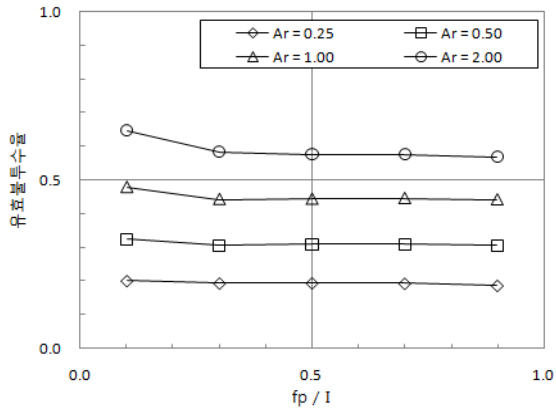
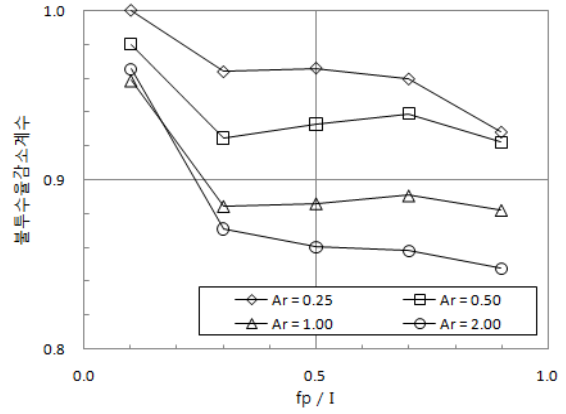


Fig. 3. Δt 에 따른 유효불투수율의 변화

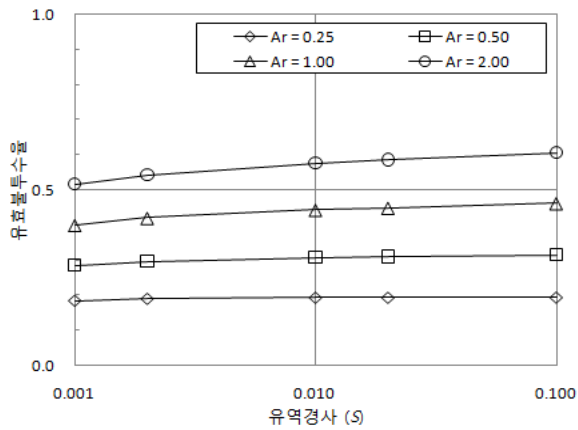


(a) 유효불투수율

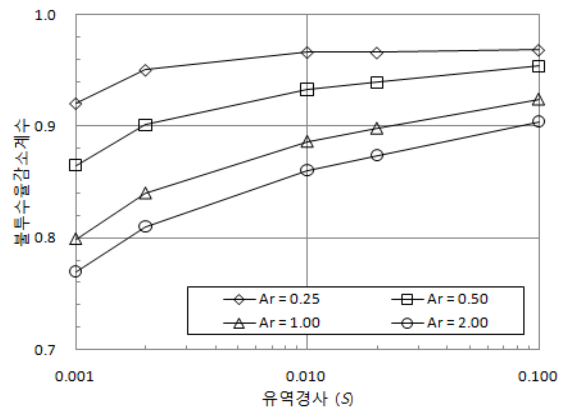


(b) 불투수율감소계수

Fig. 4. 침투능비에 따른 민감도

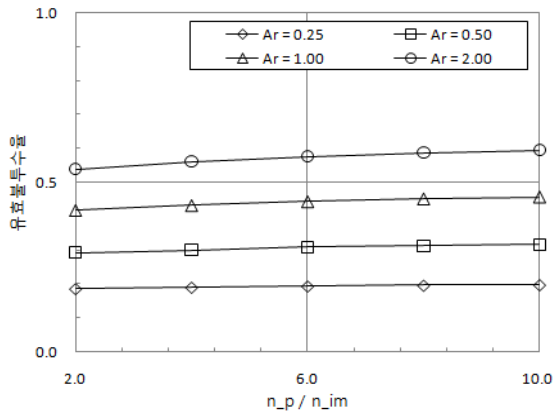


(a) 유효불투수율

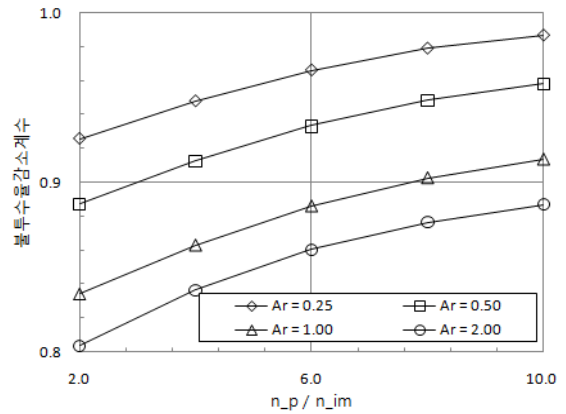


(b) 불투수율감소계수

Fig. 5. 유역경사에 따른 민감도

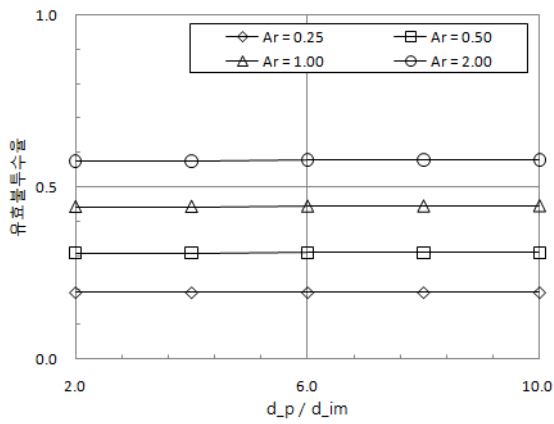


(a) 유효불투수율

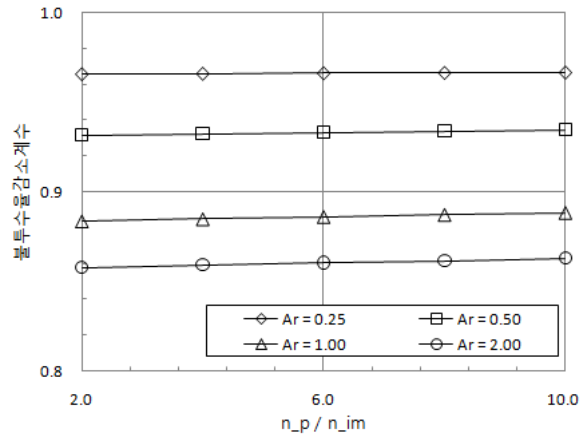


(b) 불투수율감소계수

Fig. 6. 조도계수비에 따른 민감도



(a) 유효불투수율



(b) 불투수율감소계수

Fig. 7. 저류깊이비에 따른 민감도

Fig. 6은 불투수구역의 조도계수에 대한 투수구역의 조도계수비(이하 조도계수비)에 따른 유효불투수율과 불투수율감소계수의 민감도를 도시한 것이다. 조도계수비가 증가함에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 증가하는 경향을 보인다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 유효불투수율은 41.7%에서 45.7%의 범위를 보이고 있으며, 불투수율감소계수는 83.4%에서 91.4%의 범위를 가진다.

Fig. 7은 불투수구역의 저류깊이에 대한 투수구역의 저류깊이비(이하 저류깊이비)에 따른 유효불투수율과 불투수율감소계수의 특성을 도시한 것이다. 저류깊이비가 증가함에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 다소 증가하는 경향을 보이나 그 증가율은 미미한 수준이다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 유효불투수율은 44.2%에서 44.4%의 범위를 보이고 있으며, 불투수율감소계수는 88.4%에서 88.8%의 범위를 가진다.

4. 결론

본 연구에서는 LID 기반으로 개발된 도시 소유역의 지표면유출을 운동과이론을 이용하여 해석하였다. LID를 기반으로 개발된 소유역에 대해 유출수문곡선을 산정하고 이를 이용하여 유효불투수율을 추정하였다. 불투수구역의 면적비, 침투능, 구역의 경사, 조도계수, 지표면의 저류깊이가 소유역의 유효불투수율에 미치는 민감도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 침투능비가 증가함에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 감소하는 경향을 보인다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 불투수율감소계수는 88.2%에서 95.9%의 범위를 가진다.
- (2) 유역경사가 급해짐에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 증가하는 경향을 보인다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 불투수율감소계수는 79.9%에서 92.3%의 범위를 가진다.
- (3) 조도계수비가 증가함에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 증가하는 경향을 보인다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 불투수율감소계수는 83.4%에서 91.4%의 범위를 가진다.
- (4) 저류깊이비가 증가함에 따라 유효불투수율과 불투수율감소계수는 다소 증가하는 경향을 보이나 그 증가율은 미미한 수준이다. 면적비가 1인 경우를 기준으로 불투수율감소계수는 88.4%에서 88.8%의 범위를 가진다.
- (5) 유효불투수율과 불투수율감소계수의 민감도는 주어진 모의조건 범위에서 유역경사가 가장 큰 영향을 미치며, 그 다음으로 침투능비와 조도계수비가 비슷한 수준의 영향을 미치며, 저류깊이비는 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2007-000-20009-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 건설교통부 (2000) 1999년도 수자원관리기법개발연구조사 보고서, 제1권 한국확률강우량도 작성.
2. 김대근, 박선중 (2008) 월류위험도 기반 침투형저류지 설계를 위한 평균무강우지속시간도 작성, *상하수도학회지*, **22**(2), pp. 195-203.
3. 이두진, 윤현식, 선상운, 박수동, 이동훈 (2004) 강우유출 모델을 이용한 합류식 하수관거 월류수 저류시설의 용량결정에 관한 연구 (II) - 저류조 설계를 중심으로, *대한환경공학회지*, **26**(3), pp. 370-380.
4. Guo, J.C.Y. (2008), Volume-based imperviousness for storm water designs, *J. of Irrigation and Drainage Engineering*, **134**(2), pp. 193-196.
5. Guo, J.C.Y. and Urbonas, B. (2002), Runoff capture delivery curves for storm-water quality control designs, *J. of Water Resources Planning and Management*, **128**(3), pp. 208-215.
6. Huber, W.C. and Dickinson, R.E. (1992), *Storm water management model, ver. 4: User's manual*, Rep. No. EPA/600/3-88/001a, Environmental Research Lab. Office of Research and Development, USEPA, Athens, Georgia.
7. UDFCD (2001), *Urban storm water drainage criteria manual*, Vol. 3, UDFCD, Denver.
8. USEPA (1983), *Results of the nationwide urban runoff program*, NTIS Final Rep. No. PB84185545, Washington, D.C.