지구내 저류시설의 유출저감효과 정량화 및 적정용량 결정

Determining Optimal Volume and Quantifying Runoff Reduction Effects of On-site Stormwater Detention Facilities

박창열* · 유철상** · 신상영*** · 손은정****

Park, Changyeol · Yoo, Chulsang · Shin, Sang Young · Son, Eun Jung

Abstract

The purpose of this study is to quantify the runoff reduction effects of on-site stormwater detention facilities in urban area, and to determine the optimal size of storage capacity. The modified rational equation was used to calculate the hydrograph into detention facilities. The storage effect by the facilities was estimated with respect to rainfall characteristics, land cover type, and facility sizes. Also, the optimal storage volume and the condition of location of on-site stormwater detention facilities analyzed through field survey in a case study area. This study results could be helpful to easily understand the flood reduction effect, and to determine the optimal capacity when designing on-site stormwater detention facilities in built-up areas.

Key words : On-site stormwater detention facilities, runoff reduction, modified rational equation

요 지

본 연구에서는 시가지 유역에서 이용 가능한 지구내 저류시설의 유출저감효과를 정량화하였으며, 저류시설 가용지를 대상으로 적정 설계용량을 산정해보았다. 대상 시설에 대한 유출모의를 위해 수정합리식을 이용하였으며, 유출저감효과는 침수면의 토지 피복 특성, 강우특성, 저류시설의 규모별로 정리하였다. 아울러 기성시가지 유역에서 적용 가능한 지구내 저류시설 지역을 조사하였으며, 시설물 설치시 적정 설계규모를 결정하였다. 본 연구의 결과는 기성시가지의 제한된 여건 속에서 침수재해 저감을 목적으로 지구내 저류시설을 고려할 경우, 예상되는 유출저감효과를 간단히 파악할 수 있을 뿐만 아니라 적정 설계규모를 결정하는데 이용될 수 있을 것이다.

핵심용어 : 지구내 저류시설, 유출저감, 수정합리식

서 론

최근 들어 이상기후에 의한 집중호우의 발생이 잦아지고 있다. 이로 인해 설계빈도 이상의 호우가 빈번히 발생하여 홍수방어를 목적으로 설치된 수공구조물 및 내배수시설의 부담이 가중되고 있는 실정이다. 특히, 도시 내배수시설 체계는 시설용량의 제한으로 인해 홍수방어 능력의 한계를 가질 수밖에 없으며, 이를 보완하기 위한 비구조적인 수방대책의 역할이 중요시되고 있다. 비구조적인 수방대책은 주로 유역차원의 대책으로 침수피해를 최소화하는 도시계획, 유출저감을 목적으로 한 토지이용관리, 유역차원에서의 우수유출저감시설

확충 등과 같은 적극적인 대책과 풍수해 보험, 홍수에·경보 시스템, 재해지도 작성 등과 같은 소극적인 대책이 있다.

도시유역에서 효과적인 대안 중 하나인 우수유출저감시설은 크게 침투형과 저류형으로 구분된다(KWRA, 2009). 침투형 시설은 침투트렌치, 침투측구, 침투통, 투수성 포장 등을 말한다. 이들은 불투수층에서 발생하는 직접 유출량을 토양에 일부 침투시켜 홍수저감효과와 함께 도시화로 인해 왜곡된 물순환(water cycle) 구조를 회복시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 저류형 시설은 건물, 주차장, 공원·녹지 등에 홍수량 분담을 위해 설치하는 저류조와 같은 시설을 의미하며, 침투시설보다 일반적으로 더 큰 유출저감효과를 가진다고 알

*교신저자. 정회원. 서울연구원 안전환경연구실 초빙부연구위원(Tel: +82-2-2149-1218, Fax: +82-2-2149-1199, E-mail: changyeol@si.re.kr)

Corresponding Author. Member. Associate Research Fellow, Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute

**정회원. 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Member. Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

***정회원. 서울연구원 안전환경연구실 연구위원

Member. Research Fellow, Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute

****서울연구원 안전환경연구실 연구원

Researcher, Department of Safety and Environment Research, The Seoul Institute

려져 있다(NIDP, 2001). 저류형 시설은 다시 설치형식에 따라 지구외(off-site) 저류시설과 지구내(on-site) 저류시설로 나뉜다. 지구외 저류시설의 경우는 집중형 물관리 개념에 근거한 것으로, 홍수방어를 위한 가장 효과적인 대책이 될 수 있다. 그러나 이러한 시설은 시설용량을 초과하는 기상상황에서 대처능력을 상실할 뿐만 아니라 시가지 여건상 공간적 제약이 크다는 단점이 있다. 이로 인해 유역차원에서 분산형 물관리 개념을 도입한 지구내 저류시설의 도입이 필요하다. 물론 호우의 규모와 특성이 극단적으로 변화하고 있는 상황을 감안한다면, 지구외 저류시설과 유역내에서 우수를 제어하기 위한 지구내 저류시설 모두 적극적으로 활용되어야 하는게 바람직할 것이다(Park *et al.*, 2013). 본 연구에서는 이들 시설 중 기성시가지 유역에 활용도가 높은 지구내 저류시설의 유출저감효과를 파악하는데 초점을 두고자 한다.

외국에서는 이미 1970~1980년대부터 홍수 등의 재해예방과 하천의 건전화 방지를 위하여 도로, 주차장 등의 공공시설뿐만 아니라 주택, 아파트 등의 사유시설까지도 우수유출저감시설 설치를 법적으로 제도화하고 있다(NEMA, 2009). 이와 같은 전 세계적인 흐름에 맞추어 국내에서도 우수유출저감시설과 관련된 다양한 연구가 진행되어왔다(SDI, 1995; KICT, 2004; Kim *et al.*, 2004; KSWW, 2005; Song and Im, 2007; NEMA, 2009; 2010). 최근 들어서는 빗물이용과 유역분담형 우수저류시설과 관련된 연구(NEMA, 2010)가 활발히 이뤄지고 있으며, 일례로 Han *et al.*(2012)은 빗물저류조의 저류용량 배분 및 저류시설의 위치에 따른 침투유출량의 저감효과를 평가한 바 있다. Park *et al.*(2013)은 지구내 및 지구외 저류시설의 다양한 조합에 대한 시나리오를 적용하여 각각의 유출저감 특성을 파악하였다. 아울러 도시지역의 불투수 면적을 줄이고자 하는 노력(투수성포장, 옥상녹화, 가로수목공간 조성 등)과 침수피해 저감을 위한 우수관망 배치의 최적화 문제(관망의 최적배치, 최적 유역경계 설정 등)도 눈여겨 볼만하다(Yi *et al.*, 2001; Han *et al.*, 2003; Im *et al.*, 2007; Song and Im, 2007; Kim *et al.*, 2009; Lee, 2010; Park *et al.*, 2011; Joo *et al.*, 2011; 2012).

이와 같은 연구들은 도시지역의 유출 및 침수피해 저감을 목적으로 하지만, 우수유출저감시설의 유출저감효과를 개개 시설물단위 또는 소규모 유역단위로 평가하고 있다. 아직까지 유역단위의 모형화 단계에서 이들 시설을 고려하는 방법에 대한 기준은 제시되지 못하고 있다. 물론 주차장, 공원, 학교 운동장 등과 같은 지구내 저류시설은 일반적인 구조물적 홍수방어대안들에 비해 상대적으로 규모가 매우 작은 것이 사실이다. 이로 인해 유역단위의 수문학적 유출모형에 이들 시설을 정교하게 고려하는 것은 대단히 어려운 일이다. 이를 극복하기 위한 노력으로 KSWW(2005)에서는 장기유출모형을 이용하여 빗물이용시설의 수문학적 해석을 통해 개략적인 유출저감효과를 정량화 한 바 있으며, NIDP(1999), Cha *et al.*(2005)의 연구사례와 같이 도시수문모형을 이용하여 침투홍수량을 예측하고 유출 용적을 산정한 사례들도 찾아볼 수 있다. 보다 실용적인 연구로, Carter and Rasmussen(2006)은 BMP(Best Management Practices) 시설을 대상으로 하여 유

출곡선지수의 변화를 실험적으로 도출하였으며, Yoo *et al.*(2010)은 수정합리식을 이용하여 소규모 우수유출 저류시설에 대한 유출저감효과를 간단하게 평가하기 위한 방법을 제시한 바 있다. 이와 같은 절차는 NIDP(1999)의 도시수문모형을 이용한 결과를 이용하여 검증되었으며, 보다 간편하고 효율적으로 대상시설의 유출저감효과를 정량화할 수 있음을 보였다.

이에 본 연구에서는 수정합리식을 이용하여 토지이용별로 정리된 지구내 저류시설의 저류가능용량을 파악해보고, 이들 시설의 유출저감효과를 정량화해보고자 한다. 지구내 저류시설의 입지 및 관련내용은 「하천설계기준·해설」(KWRA, 2009)에 제시되어 있으나, 그 기준에 대한 근거와 설명은 명확하지 않다. 일례로 주차장의 저류가능면적률은 84%인데, 이는 모든 주차장의 84%에 해당하는 면적이 저류시설에 기여할 수 있는 최대 면적임을 의미한다. 또한 초등학교의 경우 33%, 고등학교의 경우 28%인데, 이러한 기준은 우리나라 시가지 특성과 다소 차이가 있다. 따라서 본 연구의 궁극적인 목적은 「하천설계기준·해설」(KWRA, 2009)에 제시된 지구내 저류시설물의 기준들을 검토해보고, 이에 대한 개선안을 살펴보는데 있다. 이를 위해 Yoo *et al.*(2010)에서 제시한 방법론을 이용하여 토지이용별로 제시되는 지구내 저류시설에 대해 유출저감효과를 정량화하고, 이를 KWRA(2009)의 지구내 저류시설 기준들과 비교해보았다. 아울러 기성시가지 유역에 대한 현장조사를 통해 지구내 저류시설의 입지조건을 파악하였으며, 기본계획 단계에서 저류시설의 적정용량을 간단하게 산정해보았다.

2. 연구방법

2.1 대상 저류시설

저류시설은 설치형식에 따라 크게 지역외(off-site) 저류와 지역내(on-site) 저류시설로 구분된다. 지역외 저류시설은 유출량을 지체시키거나 이를 제어하기 위한 목적으로 유역 말단부 또는 필요지점에 설치되어 왔다. 도심지에서 발생하는 침수피해는 지형적 여건뿐만 아니라 내배수시설(관망, 펌프장 등)과 맞물려 상·하류 구분없이 발생하고 있다. 이로 인해 지역외 저류시설의 경우 도심지 내에서 산발적으로 발생하는 침수피해를 저감하는데 한계를 가질 수밖에 없다. 이에 반해 지구내 저류시설은 기본적으로 관망 또는 하천으로 유입되기 전에 우수의 이동을 억제하고, 유역내에서 우수를 일시적으로 저류하는 것을 목적으로 한다. 그러나 지구내 저류시설의 경우 저류용량이 상대적으로 작기 때문에 효과를 극대화하기 위해서는 충분한 집수면적과 많은 시설을 확보하는 것이 매우 중요하다.

이들 지구내 저류시설은 시가지 유역에서 가용면적이 제한적이기 때문에 저류수심에 따라 저류용량이 달라진다. 그러나 각각의 저류시설은 토지이용 특성과 설치위치에 따라 저류가능한 수심의 차이가 있기 마련이다. 일례로, 사람의 통행이 적은 건물간 저류나 옥상 및 정원저류의 경우에는 저류수심을 어느 정도 크게 하여도 큰 지장이 없으나, 차량 및 사람

Table 1. Available Storage Volume of On-site Storage Facilities (KWRA, 2009)

토지이용	저류장소	저류가능면적률 (%)	저류한계수심 (m)	저류가능용량 (m ³ /ha)
주택단지	건물 사이 공간의 녹지	40	0.3	1,200
주차장	주차공간	84	0.1	840
초등학교	옥외운동장	33	0.3	990
중학교	옥외운동장	32	0.3	960
고등학교	옥외운동장	28	0.3(0.5)	840(1,400)
어린이공원	인공산등을 제외한 광장	60	0.2	1,200
근린도시자연공원	운동시설용지, 광장 등	40	0.3(0.5)	1,200(2,000)

주1) () : 고등학교, 근린·소규모공원은 안전대책을 고려해 저류수심을 0.5m로 할 수도 있음

주2) 저류가능면적률 : 저류가능면적/부지면적

주3) 초등학교, 중학교, 고등학교의 저류가능면적률은 서울시 관내 학교 상황을 나타낸 통계자료 이용

주4) 주차장의 저류가능 면적률은 주차장 1개소를 기준으로 주차면의 비율을 80%로 가정함

주5) 주택단지 건물사이 공간저류의 경우 저류가능면적을 40%로 가정함

의 통행이 빈번한 주차장의 경우는 저류수심이 클 경우 안전상의 문제가 발생할 수 있다(Kang and Jo, 2011).

일반적으로 저류가능용량은 저류가능 면적률과 저류한계수심을 고려하여 Table 1과 같이 제시되고 있다(KWRA, 2009; NEMA, 2010). 그러나 Table 1의 토지이용별 지구내 저류시설 기준은 소규모 주택이 밀집되어 있는 도심지역에 그대로 적용하는데 한계가 있다. 서울과 같은 초고밀 도심지역에서 공간적 제약을 극복하기 위해서는 다목적으로 활용 가능한 저류공간을 확보하는 것이 무엇보다 중요한 것이다. 이에 대한 자세한 논의는 Kang and Jo(2011)에서 살펴볼 수 있으며, 본 연구에서는 KWRA(2009)에 제시된 토지이용별 지구내 저류시설들을 대상으로 하였다.

2.2 저류시설의 유출저감효과 정량화 방안

단위 저류시설의 도입으로 인한 유출체적의 변화는 설치 전 유출용적에서 설치될 저류시설의 용적(규모)을 감산하여 간단하게 산정될 수 있다. 저류시설의 형식에 따라(Fig. 1) 상이한 유출수문곡선을 나타내지만, 전체적인 유출체적은 동일한 결과를 나타내게 된다. 물론 침투시설과 조합된 시설의

경우는 침투량이 유출체적에 영향을 주게 된다(Fig. 1(d)). 본 연구에서는 도심지내에서 활용도가 높은 폐쇄저류 형태의 지구내 저류시설을 대상으로 하였다(Fig. 1(a)).

단위 우수유출 저감시설이 분담하게 되는 유출저감효과는 여러 가지 방법으로 정량화될 수 있다. 그러나 우수유출 저감시설과 같이 규모가 작은 시설을 어떤 지역에 어느 정도의 규모로 설치해야 하는지를 결정할 경우, 가능한 모든 경우를 수문모형에 고려하는 것은 매우 어려운 과정이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 단위 시설이 갖는 유출 저감효과를 수문해석에서 유효우량을 산정하는데 널리 이용되는 유출곡선 지수를 이용하여 정량화하였다. 이 방법은 Yoo *et al.*(2010)에 의해 제시된 방법으로, 이미 기존 연구성과(NIDP, 1999)와의 검증을 통해 그 신뢰도가 입증된 방법론이라 할 수 있다. 이를 간단히 정리하면 다음과 같다.

2.2.1 수정합리식을 이용한 도시구역에서의 유출량 산정

수정합리식은 기존 합리식의 단점을 보완하여 도시지역에서의 유출수문곡선을 계산할 수 있도록 개발된 방법이다(Yoon, 2007). 기존 합리식은 특정 재현기간의 강우로 인한

Fig. 1. Comparison of Control Volume of Hydrograph by the Storage Type (SDI, 2000)

Fig. 2. Types of Hydrographs by the Modified Rational Equation (Yoon, 2007)

첨두홍수량의 크기만을 정량화할 수 있는 방법이며, 이러한 한계에도 불구하고 간편한 계산방식으로 인해 우수관거, 하천 제방과 같은 소규모 수공구조물의 설계홍수량 결정에 널리 사용되고 있다. 그러나 본 연구의 목적과 같이 유출저감효과를 정량화하기 위해서는 유출용적을 계산해야 하기 때문에 직접적인 합리식의 적용은 불가능하다. 뿐만 아니라 일반적으로 강우지속기간은 유역의 집중시간보다 크다는 점을 감안한다면, 기존 합리식에서와 같이 설계강우강도의 지속기간을 유역의 집중시간과 같다는 가정 하에 첨두홍수량을 산정할 경우 홍수용적이 과소 추정될 여지가 높다. 물론 단위도법이나 시간면적법 등을 고려해 볼 수도 있겠지만, 대상유역의 면적이 크지 않고, 시설규모도 작은 점을 감안한다면, 수정합리식과 같이 보다 간편한 방법의 사용이 유리할 것이다. 수정합리식을 적용할 경우 설계강우의 지속기간과 집중시간의 상대적인 크기에 따라 다음과 같은 3가지 경우의 유출수문곡선의 산정이 가능해진다(Fig. 2 참조).

수정합리식은 Fig. 2와 같이 기존 합리식에서 결정되는 첨두홍수량을 이용하여 삼각형 혹은 사다리꼴 수문곡선을 이용한다(Walesh, 1989). 수문곡선의 형상은 유출용적과 매우 밀접한 관계를 갖는 요소로서 실제 저류지나 우수지의 소요용량 결정에 큰 영향을 미친다. 즉, 어떤 형태의 수문곡선을 이용하느냐에 따라 저류시설의 소요용량이 달리 결정된다. 본 연구에서도 이 점을 유의하여 수정합리식을 적용하였다.

수정합리식은 유역의 도달시간과 강우의 지속시간에 따라 상이한 수문곡선의 형태를 제시한다. 본 연구에서는 표면류의 유입시간 결정을 위한 경험공식인 미국 연방항공청 공식(Federal Aviation Agency, 1970)을 이용하였다. 이 식은 도시유역에서 표면류의 유입시간 산정에 많이 이용되며, 다음과 같다.

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

여기서 t_s 는 유입시간(min), C 는 합리식의 유출계수, L 는 표면류의 길이(m), S 는 지표면의 경사(%)이다. 공원, 운동장, 아파트 단지 등과 같은 지역은 거의 경사가 없는 지역이라고 할 수 있기 때문에 본 연구에서는 S 를 0.01%로 가정하였다.

2.2.2 유출곡선지수를 이용한 정량화

1972년에 미국 토양보존국(U.S. Soil Conservation Service (SCS), 현재는 U.S. Natural Resources Conservation Service (NRCS))에서 개발된 SCS 유출곡선지수방법(runoff curve number method)은 국내에서 널리 이용되고 있는 유효우량산정 방법 중 하나이다. 이 방법은 1970년대 후반 Sonu *et al.* (1977)에 의해 국내에 처음으로 소개되었으며, 그 후 현재까지 SCS 유출곡선지수 방법을 이용한 연구들이 다수 발표되었다(Kim, 2003).

Fig. 3. Estimation of Runoff Reduction Effects Using the Modified Rational Equation

Table 2. Parameters of Probable Rainfall Intensity Formula in Seoul (MLTM, 2011)

Return period (year)	Parameter						
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	<i>f</i>	<i>g</i>
5	4.127	-0.418	-0.05279	-0.01456	0.00308	0.00046	-0.00009
10	4.299	-0.403	-0.05984	-0.01566	0.00377	0.00053	-0.00012
30	4.513	-0.387	-0.06768	-0.01673	0.00458	0.00058	-0.00014
100	4.701	-0.375	-0.07365	-0.01748	0.00519	0.00060	-0.00016

SCS 유출곡선지수방법에서는 유역내 토양의 종류를 분류하여 나타낸 토양도와 토지이용상태를 나타낸 토지이용도, 그리고 식생피복의 처리상태(vegetal cover treatment) 및 토양의 수문학적 조건 등을 고려한다. 이들 인자들을 고려하여 직접 유출량(혹은 유효유량)에 미치는 복합적인 영향을 0에서 100 사이의 값을 가지는 무차원의 유출곡선지수로 정량화한다. 따라서 이 방법은 유역의 유출특성을 간단한 유출곡선지수로 정량화하여 평가할 수 있다는 장점이 있다. SCS 방법에서는 총강우량과 유효유량간의 관계를 다음과 같은 식으로 나타낸다(Yoon, 2007).

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P+0.8S} \quad (2)$$

$$S = \frac{25,400}{CN} - 254 \quad (3)$$

여기서 *P*는 호우별 총강우량(mm), *S*는 유역의 최대잠재보유수량(potential maximum retention)(mm)이다. 이때 *S*는 선행 토양함수조건에 따라 달라진다. SCS 방법에서는 유역의 수문학적 토양-토지피복도의 성질에 따라 유출능력의 표현이 가능한 유출곡선지수라는 변수를 정의함으로써 유출에 미치는 *S*의 효과를 간접적으로 고려한다.

수정합리식을 이용하면 저류시설 설치 전과 후의 수문곡선을 획득할 수 있으며(Fig. 3 참조), 최종적으로 Eqs. (2)~(3)의 관계를 이용하면 유출곡선지수를 역산하는 것이 가능하다.

2.3 강우조건

지속시간과 재현기간별 확률강우량은 『확률강우량도 개선 및 보완 연구』(MLTM, 2011)의 빈도해석 결과를 이용하였다. 서울 지점에 대한 최적 확률분포형은 Gumbel 분포형이

며, 다음과 같은 6차 다항식 형태의 확률강우강도식을 이용하였다.

$$\ln(I) = a + b \ln(t) + c(\ln(t))^2 + d(\ln(t))^3 + e(\ln(t))^4 + f(\ln(t))^5 + g(\ln(t))^6 \quad (4)$$

여기서 *I*는 강우강도(mm/hr), *ln*은 자연대수, *a*, *b*, *c*, *d*, *e*, *f*, *g*은 6차 다항식의 계수, *t*는 지속시간(hr)이다. 본 연구에서는 재현기간 5년, 10년, 30년, 100년에 대한 확률강우량을 이용하였으며, 이에 대한 서울 지점의 확률강우강도식 계수는 Table 2와 같다.

3. 지구내 저류시설의 유출저감 효과 정량화

3.1 저류시설 용량, 강우 지속시간, 재현기간 변화에 따른 유출저감 효과

먼저 가상유역을 대상으로 저류시설의 용량, 강우지속시간, 재현기간의 변화에 따른 유출체적의 변화를 살펴보았다. 저류시설을 기준으로 가상유역의 총집수면적은 10 ha, 지구내 저류시설의 면적은 1 ha, 저류심은 0.3 m로 설정하였다. 저류시설의 용적은 토지이용별 가용면적, 저류가능면적률과 저류심의 곱으로 결정되며, 저류가능면적률 0~100%에 대한 각각의 유출저감효과를 산정하였다. 이때 유출계수는 0.8, 강우지속시간은 20, 40, 60, 120분, 재현기간은 5, 10, 30, 100년에 대해 각각 적용하였다.

저류시설 설치 전·후의 유출용적의 차이는 설치 전 수문곡선의 유출용적에서 저류시설의 용적을 감산한 값이 된다. 이를 통해 토지이용별 지구내 저류시설에 의한 유출저감효과를 확인할 수 있다. 전체적으로 살펴보면, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 확률강우량이 작을수록(재현기간이 짧고, 강우지속시간이 짧을수록) 동일한 저류시설 용량에서도 유출저감 효과

Fig. 4. Runoff Reduction Effects According to the Rainfall Durations and Return Periods (left: runoff reduction, right: CN reduction)

가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 저류시설의 용적이 유출 용적을 모두 감당할 경우에는 100%의 유출저감효과를 보이는 것으로 나타났다. 즉, Fig. 4(a)의 우측 그림에서 볼 수 있듯이 강우지속시간 20분, 재현기간 5년의 확률강우량의 경우(저류용량/집수면적)을 0.024(m^3/m^2) 이상 되도록 저류시설 규모를 결정한다면, 하류지역에서의 유출부담을 최소화할 수 있을 것으로 나타났다. 그러나 기성시가지 유역에서 저류면적

과 저류심의 결정이 제한적이기 때문에 이러한 시설의 설계 규모를 결정할 경우에는 다양한 측면의 검토가 필요할 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4를 전체적으로 보면, 호우의 규모(강우지속시간, 재현기간 등)에 따라 유출저감효과의 차이가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서 극단적인 호우규모에 대한 홍수방어 능력을 기대하기 위해서는 가용한 지역의 전역에 걸쳐 지구내 저류시설을 최대한 설치해야 할 것으로 보인다.

3.2 토지이용별 지구내 저류시설의 유출저감효과

본 연구에서 대상으로 하는 토지이용 유형은 크게 주택단지, 주차장, 학교 운동장, 공원 광장으로 구분된다(KWRA, 2009). 앞서 설정한 집수면적(10 ha)과 저류시설 가용면적(1 ha)을 기준으로 할 경우 재현기간별로 유출저감효과를 살펴보면 Fig. 5와 같다(강우지속시간 60분, 유출계수 0.8). 이때 각 토지이용별로 유출저감효과의 특성을 파악할 수 있도록 저류가능면적률별로 효과를 정리하였다.

지구내 저류시설의 저류용적은 대상지역의 저류면적과 저류가능면적률, 저류심의 곱으로 결정된다. 이때 저류심의 경우 다양한 측면에서 고려하여 결정되었기 때문에 변동의 여지가 크게 없지만(Kang and Jo, 2011), 가능면적률은 대상시설과 지역적 여건에 의해 차이가 발생하게 된다. 이로 인해 동일한 토지이용에서도 저류용적은 대상지역 또는 대상시설마다 다르게 결정될 수 있다(KWRA, 2009). 이러한 특성을 정량적으로 파악하기 위해 Fig. 5와 같이 저류가능면적률을 기준으로 유출저감효과를 살펴보았다. 이때 KWRA(2009)에서 제시되고 있는 저류가능면적률을 같이 도시하여 그 특성이 비교될 수 있도록 하였다. 주택단지의 경우 40%, 주차장 84%, 어린이공원 60%, 근린·도시자연공원 40%를 적용하였으며, 초등학교 33%, 중학교 32%, 고등학교 28%임을 고려하여 학교는 일괄적으로 30%를 적용하였다(KWRA, 2009).

KWRA(2009)에서 제시하는 저류가능면적률을 기준으로 보면, 주차장을 저류시설로 이용할 경우 유출저감률은 재현기간별(5, 10, 30, 100년)로 각각 16.9, 14.3, 11.5, 10.6, 9.5%로 나타났으며, 어린이공원의 경우 재현기간별(5, 10, 30,

100년)로 각각 24.2, 20.4, 16.5, 15.1, 13.6%, 초등학교, 중학교, 고등학교 옥외운동장의 경우 재현기간별(5, 10, 30, 100년)로 각각 18.2, 15.3, 12.3, 11.3, 10.2%로 나타났다. 마지막으로 주택단지, 근린·도시자연공원의 경우 재현기간별(5, 10, 30, 100년)로 각각 24.2, 20.4, 16.5, 15.1, 13.6%의 유출저감률을 보이는 것으로 나타났다(Fig. 5 참조). 이는 동일한 저류면적에서 상대적으로 저류가능면적률이 높고 저류심이 큰 주택단지, 근린·도시자연공원이 저류효과의 효율이 높은 것으로 이해할 수 있다. 그러나 우리나라 특성상 주택단지는 입지적인 제약이 크고, 근린·도시자연공원의 경우 대부분이 산지에 위치하고 있다는 현실적 문제점이 있다. 이로 인해 KWRA(2009)의 지구내 저류시설의 저류가능면적률 기준이 그대로 적용될 수는 없다. 따라서 기상시가지 구역에서 지구내 저류시설의 경우 시가지 특성과 현장 여건을 반영할 수 있는 보다 유연한 기준 마련이 필요할 것으로 보인다. 이는 본 연구에서 제시되는 도표를 이용한다면, 해결될 수 있을 것이다. 즉, 본 연구의 결과는 저류가능면적률별로 유출저감효과를 제시할 수 있기 때문에 보다 유연한 설계기준으로써 활용할 수 있을 것이다. 아울러 Fig. 5와 같이 제시되는 도표를 적절히 이용한다면, 주어진 목표 유출저감률을 달성하기 위한 저류가능면적률의 결정뿐만 아니라 설계용량의 검토도 가능할 것이다.

4. 지구내 저류시설의 적정 저류용량 산정 사례

4.1 저류시설 가능지 선정을 위한 현장조사

지구내 저류시설을 고려할 경우, 설계규모는 모든 제반사항

Fig. 5. Variation of Runoff Reduction for the Land Use Types (dashed line: available area ratio)

Fig. 6. Location of School and Park Facilities in the Study Basin

을 반영하여 유출모형을 구성하고 효과 검증을 통해 결정되어야 한다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 도시유출모형에 이들 소규모 시설을 모두 고려하는 것은 현실적으로나 기술

적으로나 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 할당된 유역분담량이 주어진 경우 지구내 저류시설의 적정 설계용량을 결정해보고자 한다.

본 연구의 대상유역은 최근 들어 침수피해가 빈번하게 발생하고 있는 서울시 B-유역으로 선정하였으며, 지구내 저류시설의 대상지 선정을 위해 도시계획시설(Seoul Urban Plan portal website)을 근거로 현장조사를 실시하였다. 토지이용별 대상지 현황과 주요 현장조사 내용은 Fig. 6과 Table 3과 같다.

대상유역의 현장조사 결과, 학교의 경우 대부분 입지여건이 불리한 산 능선지역에 위치하고 있거나 주변지대에 비해 지대가 높아 유수의 집중도가 낮을 것으로 조사되었다. 또한 대규모 공영주차장은 없는 것으로 파악되었으며, 공원 역시 서울의 특성상 아주 작은 소규모 어린이공원이 대부분이며, 근린·도시자연공원은 산지에 위치하거나 분수계를 포함하고 있음을 확인하였다. 이와 같이 지구내에서 유출저감을 목적으로 설치하는 저류시설은 시가지 특성에 따라 입지 여건의 제약이 있기 마련이다. 따라서 지구내 저류시설 입지 선정시에는 현장조사를 통해 유역과 시설 특성을 면밀히 파악할 필요가 있다. 본 연구의 대상지를 전체적으로 살펴본 바, 유역내

Table 3. Field Survey for Facilities Observed Around the Study Basin

구분			면적 (ha)	주요 내용	비고
학교	1	초등학교1	0.9	-입지 여건상 우수유입 조건 불리 -주변지대보다 지대가 높아 저류시설로 활용도 높지 않음	
	2	초등학교2	1.3	-유역 하류에 위치하여 입지는 유리한 편 -주변지대보다 지대가 높아 저류시설로 활용도 높지 않음	
	3	중학교1	1.3	-분수계 근처에 위치하여 입지 여건 불리 -유량 확보 불리하여 활용도 낮음	
공원	4	근린·도시 자연공원1	64.1	-현재 수로정비 및 사방시설 완료 -저류시설 기능을 보완한다면 활용성 높음	
	5	근린·도시 자연공원2	19.0	(5-1, 무허가건물) -유수의 흐름이 집중되는 지역임 -수로정비가 잘 되어 있으며, 저류시설이 효과적일 수 있음 (5-2, A-성당 지역) -집수면적이 넓어 저류시설의 활용성 높음 -유량 확보에 유리함	
	6	근린·도시 자연공원3	19.4	-해당 공원의 지형 특성상 우수유입 조건 불리 -분수계를 따라 공원이 구성되어 있어 유량 확보 어려움	
	7	어린이공원1	0.1	-현재는 주택단지로 구성되어 있으며, 계획 중인 시설로 파악됨	
	8	어린이공원2	0.1	-우수 유입 가능성 높으며, 입지여건 좋은 편 -규모가 작은 편	
	9	어린이공원3	0.1	-분수계 근처에 위치하여 입지 여건 불리 -유량 확보 불리하여 활용도 낮음	
	10	어린이공원4	0.2	-유량 확보에 유리함 -저류시설의 면적이 넓어 저류용량 확보 유리	무허가건물
	11	어린이공원5	0.1	-분수계 근처에 위치하여 입지 여건 불리 -집수면적이 적어 유량 확보 불리	
	12	어린이공원6	0.1	-집수면적이 넓어 유량 확보 유리 -상습침수지역인 내방역 주변에 위치하여 주변 침수피해 저감에 도움이 될 것으로 보임	
	13	어린이공원7	0.2	-주변지대보다 지대가 높아 저류시설로 활용도 높지 않음 -재건축 아파트 옆에 위치	

의 우수유입이 원활하고 저류면적이 충분히 확보되는 곳은 근린·도시자연공원2내에 위치한 A-성당 주차장인 것으로 조사되었다.

4.2 적정 저류용량 산정

본 절에서는 A-성당 주차장 지역을 지구내 저류시설로 활용할 경우 목표 유출저감량에 대한 적정 설계용량을 산정해 보고자 한다. 이를 위해서는 앞서 정리한 저류용량/집수면적별로 정량화된 유출저감효과 결과가 필요하다. 따라서 대상지역과 대상 시설물에 대해서 저류용량/집수면적별 유출저감효과를 정량화하고, 정리된 도표와 주어진 유역분담량(또는 목표 유출저감량)을 이용하여 저류용량을 결정할 수 있다. 이러한 절차는 Yoo *et al.*(2009)에서 제시한 방법을 역순으로 적용한 것이다. 주차장 지역에 적용한 결과는 다음과 같다.

먼저, A-성당 주차장 유역에 대한 집수면적은 37,800 m², 유출계수 0.625, 최장 유로연장 264.9 m, 유역평균경사 0.31로 나타났다. 이때 KWRA(2009)에서 제시된 주차장의 한계 저류심 0.1 m를 적용하여 유출총량의 목표 저감량을 10%로 할 경우에 대한 시설의 설계용량은 Fig. 7과 같다.

앞서 살펴본 바와 같이 지구내 저류시설의 특성상 설계빈도가 커질수록 유출저감효과는 제한적일 수밖에 없다. 뿐만 아니라 목표 유출저감량이 증가할수록 유출저감을 위한 시설용량 역시 크게 확대되는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 실제 사례지역에서도 동일하게 나타난다(Fig. 7 참조). Fig. 7에서 볼 수 있듯이 실제로 지구내 저류시설을 기성시가지 유역에 고려할 경우 저류가능면적물은 시설 및 유역 특성에 따라 크게 차이가 나기 마련이다. 따라서 본 연구에서 이용한 적정 저류용량 산정 방법은 간편하고 보다 실용적이라 할 수 있다. 아울러 이와 같은 결과는 대상 저류시설의 저류용량이 목표 유출저감률을 충분히 달성할 수 있는지에 대한 근거로 활용될 수도 있을 것이다.

Fig. 7에 나타난 X-축의 '저류용량/집수면적'을 저류지 필요면적(저류심 0.1 m인 경우)으로 환산하여 정리하면 Table 4와 같다.

현재 주차장의 면적은 약 1,300 m²로 조사되었으며, 저류가능면적률 84%과 저류심 0.1 m를 고려할 경우 재현기간 30

Fig. 7. Determination of Optimal Volume Based on the Runoff Reduction

Table 4. Area of Detention Facilities Derived for Return Periods (unit: m²)

목표 유출저감량 (%)	재현기간 (년)			
	5	10	30	100
-1	74.2	86.1	104.1	123.3
-2	148.4	172.3	208.2	246.6
-3	222.6	258.4	312.3	370.0
-5	370.9	430.7	520.5	616.6
-10	741.9	861.4	1041.0	1233.2
-20	1483.8	1722.7	2082.0	2466.4

년에 목표 유출저감량은 약 10%를 부담할 수 있는 규모가 된다. 물론 유역단위 규모에서는 해당 유출저감량이 미치는 영향력이 축소될 수 있는 것이 사실이다. 그러나 공간적 제약이 많은 도심지 유역에서 지구내 저류시설은 하류의 유출부담을 최소화하는 측면이나 관망의 설계빈도를 초과하는 강우로 인해 발생하는 지선구간의 월류구간을 해소하는 측면에서 유리하다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지구내 저류시설에 대한 유출저감효과를 토지이용별로 정량화하였으며, 저류시설 가용지를 대상으로 적정 설계용량을 산정해보았다. 대상시설에 대한 유출모의를 위해 수정합리식을 이용하였으며, 토지이용별 지구내 저류시설의 특성을 고려하여 유출저감효과를 유출저감률과 유출곡선지수의 감소율로 정리하였다. 아울러 시가지 유역에 대한 현장조사를 통해 기성시가지에서 가용한 지구내 저류시설의 입지 특성을 파악하였으며, 적정 설계용량을 간단한 방법으로 결정해보았다.

분석 결과, 지구내 저류시설의 경우 호우의 규모에 따라 유출저감효과의 차이가 크게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 극단적인 호우규모에 대한 홍수방어 능력을 기대하기 위해서는 가용한 지역 전역에 걸쳐 지구내 저류시설을 최대로 고려해야 할 것으로 보인다. 토지이용별 지구내 저류시설의 저류가능용량은 유역상황과 시설물 특성에 따라 달라질 수 있으며, 저류가능면적률의 경우 우리나라 도시특성에 맞는 보다 유연한 기준이 적용되어함을 확인할 수 있었다. 또한 현장조사를 통해 조사한 결과, 본 연구에서 제안하는 방법은 기성시가지 유역에서 지구내 저류시설을 고려할 경우 적정 설계규모를 파악하는데 이용될 수 있음을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 기 설치된 시설, 설치 예정 또는 계획 중인 저류시설로 인해 저감되는 유출량을 평가할 경우에도 효율적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 아울러 본 연구의 성과는 도시유역에서 침수저감을 위한 지구내 저류시설의 배치전략에 근거자료로 활용될 수 있을 것이다.

한편 본 연구에서는 우수유출 저감시설의 유출저감효과를 단기 호우사상에 대해서만 적용하였다. 이로 인해 장기적인 측면에서의 유출저감 효율을 파악하기에는 한계가 있다. 향후 선행강우, 무강우일수 등을 고려한 장기유출모의를 수행하여

지구내 저류시설의 효율 및 효과를 평가할 수 있다면, 시설 물이 갖는 장기적인 유출저감 특성뿐만 아니라 환경적인 측면과 물재이용 측면에서의 장단점을 파악해볼 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 첨단도시개발사업의 연구비지원(11첨단도시G09)에 의해 수행되었습니다. 연구자원에 감사드립니다.

References

- Carter, T.L. and Rasmussen, T.C. (2006) Hydrologic Behavior of Vegetated Roof. *Journal of The American Water Resources Association*, Vol. 42, No. 5, pp. 1261-1274.
- Cha, H.W., Jang, J.K., Hong, C.U., and Kim, K.H. (2005) A Study on Optimal Sizing of Storage Tank in Urban Area using SWMM. *Proceedings of the Korean Society on Water Quality-Korean Society of Water and Wastewater 2005 Spring Annual Conference*, pp. 563-566.
- Federal Aviation Agency, Department of Transportation (1970) *Advisory Circular on Airport Drainage*, A/C 050-5320-5B, Washington, D.C.
- Han, M.Y., Kim, J.K., and Park, S.C. (2003) The Effect of Greening Roof on the Quantity and Quality of Rainfall Runoff. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, Vol. 19, No. 11, pp. 279-285.
- Han, M., Kum, S., Mun, J., and Kwak, D. (2012) The Effect of Decentralized Rainwater Tank System on the Reduction of Peak Runoff - A Case Study at M Village -. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 45, No. 1, pp. 65-73.
- Im, J., Song, J., Park, S., and Park, H. (2007) An Experimental Study on Infiltration Characteristics of Facilities for Reducing Runoff Considering Surface Materials According to Housing Lot Developments. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 8, No. 5, pp. 47-55.
- Joo, J.G., Cho, H.J., Lee, Y.H., and Kim, J.H. (2011) Development of Infiltration Facility by Utilizing Tree Box for Urban Storm Water Runoff Reduction. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 12, No. 11, pp. 5330-5336.
- Joo, J.G., Lee, Y.H., Cho, H.J., and Kim, J.H. (2012) Analysis of Long-term Runoff Reduction Effects by Installation of Street Tree Box. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 2, pp. 193-197.
- Kang, S. and Jo, S.H. (2011) *A Pilot Study for the Implementation of Urban Rain Detention Storages*. Gyeonggi Research Institute.
- Kim, J.H., Joo, J.G., Jun, H.D., and Lee, J.H. (2009) A Study of Sewer Layout to Control a Outflow in Sewer Pipes. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-7.
- Kim, K.T. (2003) Determination of SCS-CN using Detailed Soil Map. *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 36, No. 4, pp. 45-53.
- Kim, Y.R., Kim, J.Y., and Hwang, S.H. (2004) Application of Stormwater Detention Facilities for Lacking Capacity of Sewers. *Journal of the Korean society of Water and Wastewater*, Vol. 18, No. 3, pp. 343-350.
- Korea Institute of Construction Technology (KICT) (2004) *21st Century Frontier R&D Program -Sustainable Water Resources Research Program- Technology for Rainwater Storage and Utilization*. Korea Institute of Construction Technology.
- Korea Water Resources Association (KWRA) (2009) *River Design Standard*, Korea Water Resources Association.
- Korean Society of Water and Wastewater (KSWW) (2005) *A Study on Management Monitoring and Operation for Rainwater Facility*. Korean Society of Water and Wastewater.
- Lee, J.H. (2010) A Change of Peak Outflows due to Decision of Flow Path in Storm Sewer Network. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 11, No. 12, pp. 5151-5156.
- National Institute for Disaster Prevention (NIDP) (1999) *Study on the Storage and Infiltration Facilities for Reducing of Runoff Quantity(II)*. National Disaster Management Institute.
- National Institute for Disaster Prevention (NIDP) (2001) *Study on the Storage and Infiltration Facilities for Reducing of Runoff Quantity(IV)*. National Disaster Management Institute.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2009) *Research on Optimization of Urban Flood Mitigation Facilities*. National Emergency Management Agency.
- National Emergency Management Agency (NEMA) (2010) *Type, Structure, Construction and Maintenance Standards of Stormwater Storage Facilities*, National Emergency Management Agency.
- Park, C., Shin, S.Y., and Son, E.J. (2013) Analyzing the Reduction of Runoff and Flood by Arrangements of Stormwater Storage Facilities. *Journal of Korean Society on Water Environment*, Vol. 29, No. 1, pp. 45-54.
- Park, J.R., Lee, J.H., Choi, W.J., and Jeong, S.M. (2011) Analysis of Overflow Volume Reduction Effect by Sewer Networks Optimization in Urban. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 11, No. 6, pp. 249-257.
- Seoul Development Institute (SDI) (1995) *Control Measures for Urban Storm Runoff Reduction*. Seoul Development Institute.
- Seoul Urban Plan portal website <http://urban.seoul.go.kr/4DUPIS>
- Song, J.W. and Im, J.H. (2007) An Experimental Study on Runoff Reducing Effect of Infiltration-Storage System due to Rainfall Intensity. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 7, No. 4, pp. 85-95.
- Sonu, J.H., Yoon, Y.N., Shim, S.B., and Lee, S.T. (1977) Determination of Effective Rainfall by US SCS Method and Regression Analysis. *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 10, No. 2, pp. 101-111.
- Walesh, S.G. (1989) *Urban Surface Water Management*. John Wiley and Sons, Inc., New York.
- Yi, J., Yeo, W.G., Shim, J.H., and Kang, T.H. (2001) Analysis of Stormwater Runoff Reduction Effects by Using Porous Pavement. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 21, No. 6, pp. 645-654.
- Yoo, C., Kim, K., Park, M., and Yoon, J. (2010) Quantification of Flood Reduction Effect of Small Stormwater Detention Facilities by SCS Curve Number. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 3, pp. 109-118.
- Yoon, Y.N. (2007) *Hydrology*. Cheong Moon Gak Publishers.

© Received March 20, 2013

© Revised March 26, 2013

© Accepted May 21, 2013