

SWMM 엔진을 이용한 엑셀 기반의 저류지 규모 산정 프로그램 개발

Program Development for Detention Pond Sizing Based on Excel Using SWMM Engine

정용길* · 강태욱**

Jeong, Yonggil*, and Kang, Taeuk**

Abstract

In this study, we developed a program for detention pond sizing based on Excel in order to improve user convenience. The program includes a function for the derivation of flood hydrograph that was embodied by using the rational method hydrograph for connecting the design of the stormwater pipe. The design method of a permeable detention pond that is a kind of low impact development (LID) technique was also implemented. In addition, the operation of the program was found to be stable, and various discharge structures such as weir, pump, and pipe could be easily conducted using the engine of the stormwater management model (SWMM). The developed detention pond sizing program was applied to the actual design. Subsequently, similar results were derived by comparing with the actual design, and it was found that the program was appropriate.

Key words : Detention Pond, Excel, SWMM, Rational Method Hydrograph, Permeable Detention Pond

요 지

본 연구에서는 사용자의 편의성을 높이기 위해 엑셀 기반의 저류지 규모 산정 프로그램을 개발하였다. 해당 프로그램은 우수 관거 설계와 연계를 고려하여 합리식 수문곡선 방법을 이용한 홍수 수문곡선의 유도 기능이 포함되어 있고, 저영향개발과 관련된 침투 저류지의 설계에도 적용될 수 있다. 또한, SWMM의 엔진을 이용하기 때문에 계산이 안정적이고, 위어, 펌프, 관 등 다양한 방류 구조물을 쉽게 구현할 수 있다. 개발된 저류지 규모 산정 프로그램은 실제 설계된 저류지에 대하여 적용되었다. 그 결과, 실제 저류지 계획과 유사한 결과가 도출되었고, 이를 통해 개발된 저류지 규모 산정 프로그램은 적절한 것으로 판단되었다.

핵심용어 : 저류지, 엑셀, SWMM, 합리식 수문곡선, 침투 저류지

1. 서 론

자연유역이 개발(도시화)되는 경우에는 불투수 지역의 증가와 우수 관거의 설치 및 배수로의 정비 등으로 인해 침투유량이 증가하고, 도달시간은 단축되어 재해의 유발 가능성이 커진다(Korea National Housing Corporation,

1997). 그리고 이러한 유역 개발에 따라 증가된 유출을 저감 시키기 위해 일반적으로 우수유출 저감시설이 계획된다(MPSS, 2016).

우수유출 저감시설은 저감 방법에 따라 저류시설과 침투 시설로 구분되고(MPSS, 2017), 홍수의 경우에는 상대적으로 침투에 의한 저감 효과가 크지 않기 때문에 주로 저류시설

*정회원, 한국토지주택공사 대구경북지역본부 차장(E-mail: channels@lh.or.kr)

Member, Manager, Daegu Gyeongbuk Local Headquarter of Land & Housing Company

**교신저자, 정회원, 부경대학교 방재연구소 전임연구교수(Tel: +82-51-629-7720, Fax: +82-51-629-6063, E-mail: ktw62@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Research Professor, Disaster Prevention Research Institute, Pukyong National University

이 계획되고 있다. 이때, 저류시설이란, 우수가 우수지 및 하천으로 유입되기 전에 일시적으로 저류시켜 바깥 수위가 낮아진 후에 방류하여 유출량을 감소시키거나 최소화하기 위하여 설치하는 유입시설, 저류지, 방류시설 등의 시설을 말한다(MPSS, 2017).

저류지 계획에 관한 선행 연구로서, Park et al. (2007)은 저류지 홍수조절용량에 대한 다양한 모형(단순 공식)을 비교하여 예비 설계 목적에 활용 가능한 모형을 제시하였다. Oh et al. (2008)은 산지 개발지역의 홍수피해 저감을 위한 저류지의 설치 위치 선정과 초기 용량 산정에 관한 연구를 수행하였다. 그리고 Kim and Park (2011)은 합리식 기반의 하도외(off-line) 저류지 계획을 위한 예비 저류지 용량 산정 방법을 제시하였고, Kim et al. (2011)에서는 임계 지속기간을 결정하기 위한 반복 계산없이 합리식과 일반형의 강우강도식을 이용하여 저류지의 최대 저류량을 직접 결정할 수 있는 방법을 제안하였다.

근해 개발된 저류지 규모 산정 프로그램은 두 가지 관점에서 기술적, 학술적 의의를 가진다. 우선, 저류지 계획은 일반적으로 유역 개발에 따라 증가된 홍수량 제어를 목적으로 계획되고, 이는 필연적으로 신규 우수 관거의 계획과 연계되어 있다. 하지만 우수 관거 계획에서는 합리식을 이용하여 침투유량만을 결정하는 반면, 저류지 규모 산정에는 저류지 유입 수문곡선의 결정이 필요하다. 이에 따라 저류지를 계획하는 경우, 별도의 강우-유출 모형을 이용하여 저류지 유입 수문곡선을 결정한다. 근해 연구에서는 우수 관거 계획과 저류지 계획의 연계를 고려하여 침투유량을 이용한 홍수 수문곡선의 유도 방법을 저류지 규모 산정에 활용하였다. 두 번째는 최근에 대두되고 있는 저영향개발(Low Impact Development, LID) 기법 중 일부로서 침투 기능이 있는 저류지가 고려되도록 하였다. 일반적인 침투 저류지 설계에서는 비침투량 방법을 이용하는데, 이는 상대적으로 토양의 영향을 적게 고려하는 방법이다(Seoul Metropolitan City, 2013). 하지만 소규모 침투 시설과는 달리 침투 저류지는 대부분 토양의 특성에 의해 침투량이 결정되는 시설로서 비침투량을 이용하는 방법이 적절하지 않을 수 있다. 이에 본 연구에서는 지하수 흐름의 물리적 현상을 이용하여 유도된 Green-Ampt 식(Green and Ampt, 1911)을 이용하여 침투 저류지를 설계하도록 하였다.

한편, 본 연구에서 개발한 저류지 규모 산정 프로그램은 엑셀 기반으로 개발되어 사용자의 편의성이 높다. 그리고 저류지 규모 산정 시 저수지 추적(reservoir routing) 모듈은 SWMM의 엔진을 이용하기 때문에 안정적인 계산이 가능하다. 또한, SWMM의 엔진을 이용하여 저수지 추적을 수행함에 따라 SWMM에서 고려 가능한 위어, 관, 펌프 등 다양한 방류 구조물에 의한 방류량이 수리학적으로 쉽게 결정될 수 있다.

본 연구에서는 개발된 저류지 규모 산정 프로그램을 실제

저류지 계획에 적용하여 분석 결과의 적절성을 검토하였다. 이때 저류지 규모 산정 프로그램의 적용성 평가에 사용된 대상 저류지는 각각 침투가 발생되지 않는 일반 저류지 2개소와 침투 저류지 1개소이다.

2. 저류지 규모 산정 프로그램의 개발

2.1 프로그램의 구동 체계

본 연구에서는 사용자의 편의성을 높이기 위해 저류지 규모 산정 프로그램을 엑셀 기반으로 개발하였다. 그리고 해당 프로그램은 EPA-SWMM의 저수지 추적 엔진을 이용하여 개발되었다. 이에 EPA-SWMM의 입력 파일을 구축하고 EPA-SWMM을 실행시키며, EPA-SWMM의 모의 결과를 불러오는 일련의 과정을 엑셀 프로그램 내에 구현하였다. Fig. 1은 개발된 저류지 규모 산정 프로그램의 구동 체계를 나타낸다. 사용자가 엑셀에 저류지 규모 산정에 관한 자료를 입력한 후 실행하면, 이후의 과정은 엑셀 비주얼베이직 어플리케이션(Visual Basic for Application, VBA)으로 작성된 코드에 따라 순차적으로 자동 수행된다.

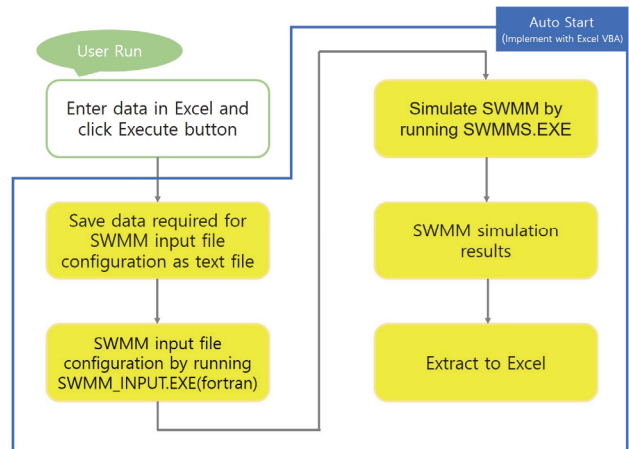


Fig. 1. Execution Process of the Program

2.2 주요 개발 항목

2.2.1 저수지 추적

저류지 규모는 Fig. 2와 같이 저수지 추적(reservoir routing)을 통해 결정될 수 있다. 이러한 저수지 추적을 위해서는 저류지의 제원, 저류지 유입량(수문곡선), 방류 구조물과 방류 조건이 결정되어야 한다. 본 연구에서는 사용자 편의를 높이기 위해 엑셀 시트에 저수지 추적에 관한 자료를 입력할 수 있도록 구성하였다. 그리고 저수지 추적에는 SWMM의 엔진이 이용되었다.

참고로 Fig. 2에서 $I(t)$, $O(t)$, $S(t)$ 는 각각 저류지의 시간에 따른 유입량, 방류량, 저류량이고, T 는 유입 수문곡선의 기저시간, T_i , T_r 은 각각 유입 수문곡선의 상승 및 하강

시간, T_{lag} 는 저류지에 의한 지체시간(방류 침투시간-유입 침투시간), a 는 침투유량 저감량(유입 침투유량-방류 침투유량), t_1 은 유입 수문곡선과 방류 수문곡선의 교차점으로서 저류지의 최대 수위가 발생하는 시점이다.

SWMM은 수리학적으로 안정적인 모형이고, 위어, 관, 펌프 등 다양한 방류 구조물과 저류지의 하부를 통한 침투를 고려할 수 있다. 따라서 다양한 방류 구조물을 고려한 저류지 모의를 쉽고 안정적으로 계산할 수 있는 장점을 가진다. 또한, 본 연구의 목적 중 하나인 침투 저류지를 모의할 수 있다. 침투 저류지 모의 기능에 관한 내용은 2.2.3절에 자세히 기술하였다.

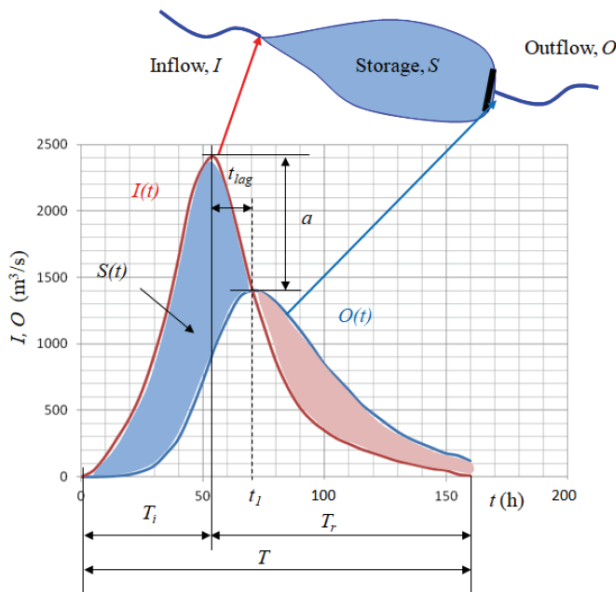


Fig. 2. Schematic Diagram of Reservoir Routing (Ionescu and Nistoran, 2019)

2.2.2 홍수 수문곡선의 유도

일반적으로 우수 관거의 설계에 사용되는 합리식에서는 침투유량만 결정되는 반면, 저수지 추적에는 시계열로 구성된 홍수 수문곡선이 요구된다. 따라서 저류지 설계에 우수 관거의 설계 자료를 이용하기 위해서는 침투유량을 이용하여 저류지로 유입되는 홍수 수문곡선을 유도할 필요가 있다. 본 연구에서는 침투유량을 이용한 홍수 수문곡선의 유도를 위해 합리식 수문곡선(rational method hydrograph)을 이용하였다.

합리식 수문곡선은 Guo (2001), Maracineanu et al. (2009), Cleveland et al. (2011) 등에서 소개하고 있다. 합리식 수문곡선은 Fig. 3과 같은 삼각형의 형태를 가지는데, 가로축은 시간, 세로축은 유량을 나타낸다. 수문곡선의 침투유량은 합리식에 의해 결정되는 홍수량(Q_p)이다. 그리고 유출 발생 후부터 침투유량 도달에 이르는 시간인 수문곡선의 상승 시간은 도달시간(t_c)으로 결정된다. 이는 도달시간에서 유량

이 최대가 되는 합리식의 가정으로부터 결정된 것이다. 침투유량 발생 이후의 수문곡선 하강 시간은 도달시간에 감수부계수(Receding Limb Factor, RLF)를 곱하여 결정된다.

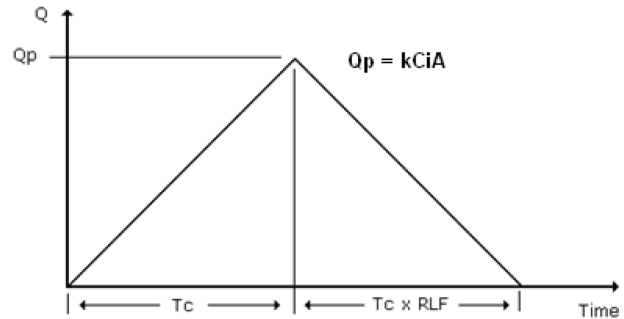


Fig. 3. Rational Method Hydrograph (Maracineanu et al., 2009)

2.2.3 침투 저류지 모의 기능

침투 저류지는 저류지의 바닥을 통해 원지반으로 침투가 발생하는 저류지이다. 일반적으로 침투 저류지 설계에서는 Eqs. (1)과 (2)에 제시된 비침투량, 기준침투량 산정을 통해 설계침투량을 결정한다(Seoul Metropolitan City, 2013).

$$Q_f = \frac{Q_t}{K_t} \times K_f = k_0 \times K_f \quad (1)$$

$$Q = C \times Q_f \quad (2)$$

여기서, Q_f 는 설치시설의 기준침투량(침투시설 1 m 또는 1 m²당 1 m³/hr), Q_t 는 침투시설의 최종침투량(m³/hr), K_f 는 설치시설의 비침투량(m³), K_t 는 시험시설의 비침투량(m³), k_0 는 토양의 포화투수계수(mm/hr), Q 는 설계 침투량, C 는 영향계수이다. Seoul Metropolitan City (2013)에 따르면, 기준침투량을 정확히 평가하기 위해서는 토양의 포화·불포화 특성을 고려한 이론적인 해석이 필요하다. 하지만 이러한 과정은 복잡하므로 토양의 물성에 크게 영향을 받지 않는 비침투량(침투시설의 침투량을 포화투수계수로 나눈 값)을 이용해서 기준침투량을 산정하고 있다.

금회 개발된 저류지 규모 산정 프로그램은 SWMM의 엔진을 이용하고, SWMM은 저류지의 침투 기능을 Green-Ampt 식을 이용하여 모의한다. Green-Ampt 식은 지하수 흐름에 관한 물리적 현상을 이용하여 유도된 방법으로서 Green and Ampt (1911)에 의해 소개된 침투량 산정 방법이다. Green-Ampt 식은 Eq. (3)과 같다.

$$f(t) = K \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right) \quad (3)$$

여기서, $f(t)$ 는 시간 t 에서 침투율(mm/hr), K 는 포화 투수계

수, ψ 는 흡인 수두, $\Delta\theta$ 는 초기 함수비 부족분, $F(t)$ 는 시간 t 까지 발생된 누가 침투량이다.

Green-Ampt 식을 이용하기 위해서는 포화 투수계수, 흡인 수두, 초기 함수비 부족분이 입력자료로 정의되어야 한다. 참고로, Rawls et al. (1983)은 포화 투수계수, 흡인수두 등과 같이 토양 종류에 따라 분류될 수 있는 매개변수에 대한 실험 결과를 제시하였다. 관련하여 SWMM의 사용자 설명서 (Huber and Dickinson, 1992; Rossman, 2009)에서도 Rawls et al. (1983)의 연구결과를 참조하도록 제공하고 있다. 한편, 초기 함수비 부족분은 토양의 간극률과 초기 함수비의 차이로서 일반적으로 0.03~0.3의 값을 가지는데, 설계에서는 일반적으로 0.1과 같이 작은 값을 사용한다(Bedient and Huber, 2002).

2.3 엑셀 기반의 저류지 규모 산정 프로그램

2.3.1 엑셀 시트의 구성

엑셀로 구성된 저류지 규모 산정 프로그램은 하나의 엑셀 파일이지만, 기능별로 총 9개의 시트로 구성된다. 그리고 시트의 종류는 크게 프로그램 설명 및 실행 시트, 입력 자료 시트, 계산 과정 시트, 계산 결과 시트인 4가지로 구분된다. Fig. 4는 설명서 및 실행 시트를 활성화한 상태의 화면으로 4가지의 시트 종류에 따라 색깔이 구분되어 있는 것을 볼 수 있다. 참고로 상기의 시트들 가운데 4개의 회색 시트(계산 과정 시트)들은 프로그램 개발에 필요한 과정들을 구성하기 위해 생성한 시트들로서, 사용자의 접근은 필요하지 않다.

Fig. 4의 ‘설명서 및 실행’ 시트는 프로그램 실행에 관한 간단한 설명과 실행 단추로 구성되어 있다. 개발된 저류지 규모 산정 프로그램은 사용자가 직접 입력해야 하는 셀과 자동으로 계산되는 셀 등이 존재한다. 본 연구에서는 셀을 기능에 따라 색깔로 구분하여 사용자가 정보를 직관적으로

판단할 수 있도록 하였다.

2.3.2 입력자료 구현

저류지 계획에 필요한 입력 자료는 ‘저류지 입력자료’, ‘유입 수문곡선’, ‘방류 구조물 입력자료’ 시트에 입력된다.

Figs. 5와 6은 각각 ‘저류지 입력자료’ 시트와 ‘유입 수문곡선’ 시트의 화면을 나타낸다. 해당 시트들은 저류지의 계획과 관련된 시트이다. 우선, 저류지 규모를 결정하기 위해서는 계획된 저류지로 유입되는 유입량 시계열이 결정되어야 한다. 금회 개발된 저류지 규모 산정 프로그램에서는 침투유량을 이용한 홍수 수문곡선의 유도 기능과 사용자가 직접 수문곡선을 입력하는 기능을 모두 구현하였다. 각각에 대한 입력자료는 ‘저류지 입력자료’와 ‘유입 수문곡선’ 시트에서 정의되고, Figs. 5와 6의 오른쪽의 그림들은 각각의 조건에서 입력된 정보에 따라 생성되는 저류지 유입 수문곡선의 사례를 나타낸다. 한편, ‘저류지 입력자료’ 시트에는 저류지의 수심과 수표면적 관계 등의 저류지 제원과 관련된 정보와 계획된 저류지의 바닥 침투 가능 여부와 이와 관련된 매개변수가 입력된다.

‘저류지 입력자료’ 시트에서는 드롭 다운 목록을 이용하여 관(conduit), 위어(weir), 펌프(pump), 방류부(outlet) 중 선택할 수 있다(Fig. 5 참조). 이와 관련하여 ‘방류 구조물 입력자료’ 시트에는 ‘저류지 입력자료’ 시트에서 선택된 방류 구조물에 대한 구체적인 입력자료가 결정된다. 방류 구조물별 입력자료는 독립된 표로 구분되고, ‘저류지 입력자료’ 시트에서 선택한 방류 구조물에 대해서만 입력하면 된다. Fig. 7은 ‘방류 구조물 입력자료’ 시트의 화면을 나타낸다.

2.3.3 출력 결과 구현

Fig. 8의 ‘모의 결과’ 시트는 저류지 규모 산정 프로그램의 최종 모의 결과를 제공하는 시트로서, 입력된 정보를 이용하

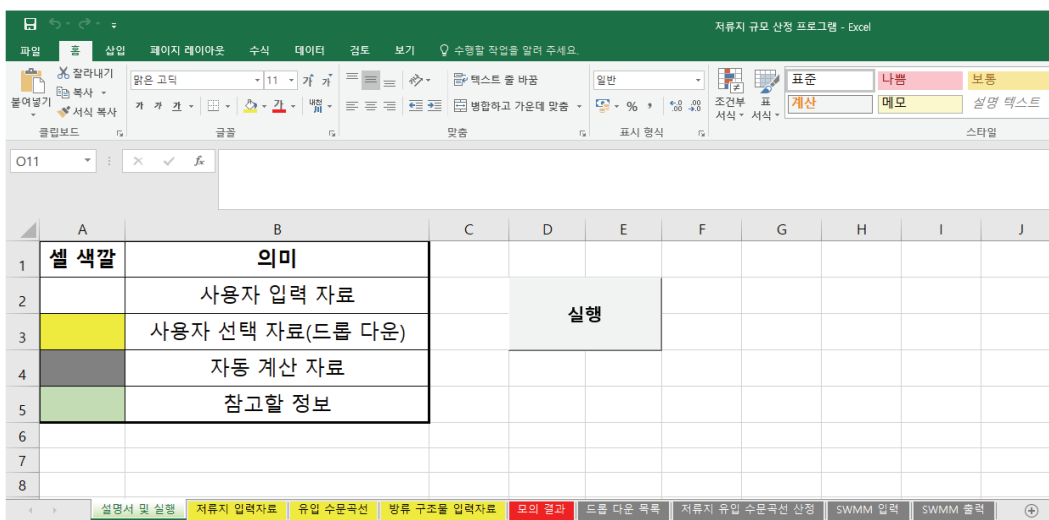


Fig. 4. Program for Detention Pond Sizing Based on Excel

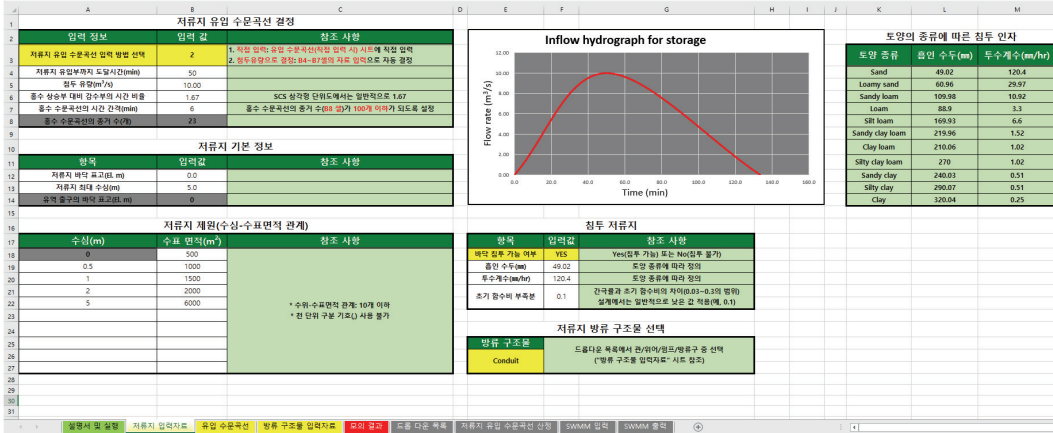


Fig. 5. 'Input Data of Detention Pond' Sheet

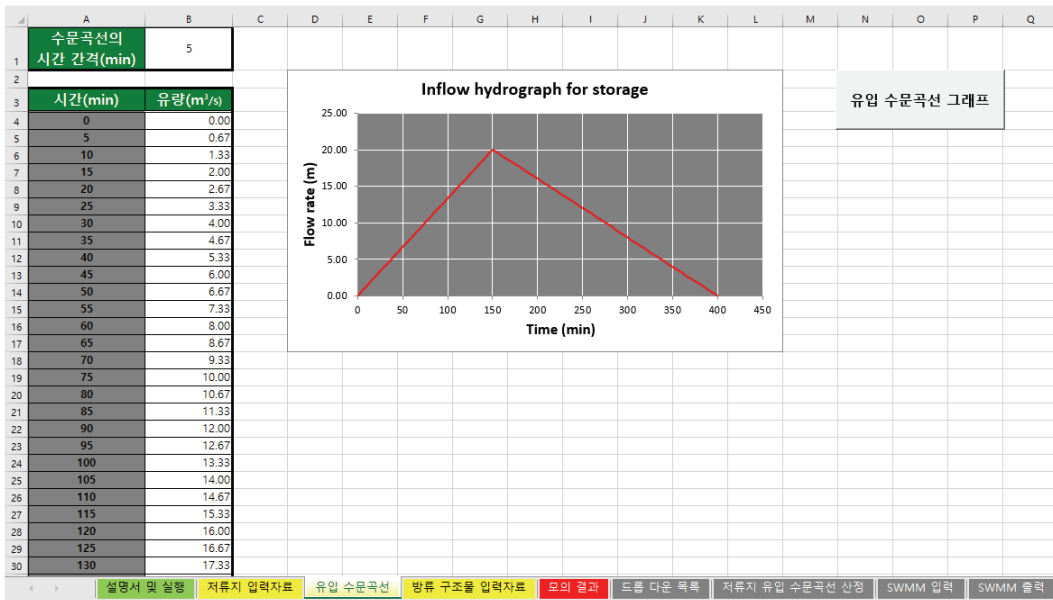


Fig. 6. 'Inflow Hydrograph' Sheet

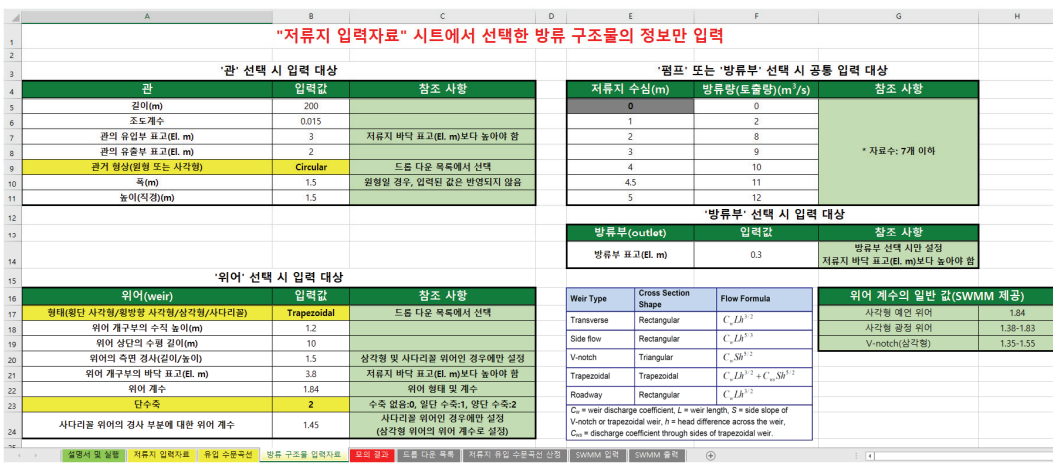
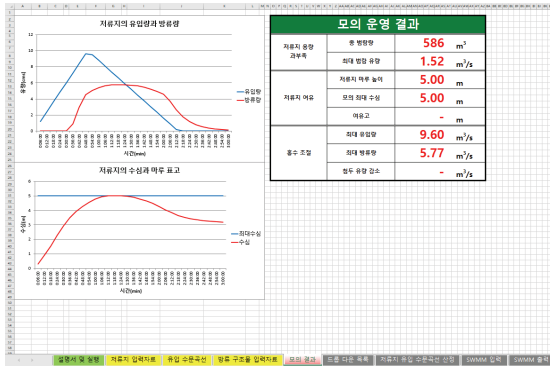
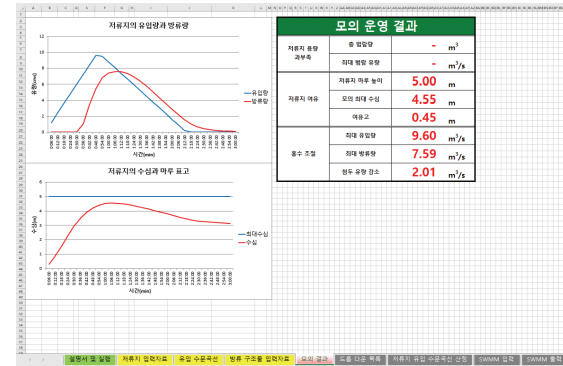


Fig. 7. 'Input Data of Discharge Structure' Sheet



(a) An example for unsuitable plan



(b) An example for suitable plan

Fig. 8. 'Simulation Results' Sheet

여 SWMM 모형의 엔진을 통해 저수지 추적한 결과를 제공하는 시트이다. 해당 시트에는 시간에 따른 저류지의 유입량과 방류량을 그래프로 제시하여 저류 효과를 시각적으로 확인할 수 있다. 또한, 시간에 따른 저류지의 수심 변화를 저류지 마루 표고와 함께 도시하여 저류지 규모의 적절성을 검토할 수 있다. 즉, 저류지의 수심이 마루 표고를 넘지 않으면서 저류 공간을 충분히 활용하는지를 확인할 수 있다.

예로서 Fig 8의 (a)는 저류지 규모와 방류 구조물의 계획이 적절하지 못한 상태를 나타낸다. 즉, 저류지의 유입량을 충분히 조절하지 못하여 저류지의 모의 최대 수심이 저류지 마루 높이를 상회하여 범람이 발생하는 것을 보여준다(총 범람량 586 m³). 반면에, Fig 8의 (b)은 동일한 저류지 규모에서 방류 구조물의 용량을 증가시켜 0.45 m의 저류지 여유고를 가지도록 계획된 결과를 보여준다. 그리고 해당 조건에서

달성된 홍수 조절 효과(침투 유량 감소)는 2.01 m³/s임을 나타내고 있다.

3. 저류지 규모 산정 프로그램의 적용성 평가

3.1 일반 저류지에 대한 적용성 평가

개발된 저류지 규모 산정 프로그램에 의한 일반 저류지 설계의 적용성을 평가하기 위해 김해시 삼계동에 기 계획된 저류지의 설계 결과와 비교하였다. 김해시 삼계동의 저류지는 김해시 삼계동 948-11 일원에 위치하고, 단독 주택 부지 조성 에 따라 계획된 저류지이다. 분석에 사용된 입력자료는 Gagyo Corporation (2019)에서 수행한 저류지 계획에 관한 설계 자료이다. 김해시 삼계동에는 2개의 저류지(SSG1, SSG2)가 계획 되었고, 해당 저류지의 설계 제원은 Table 1과 같다.

Table 1. Design Specifications of Detention Pond in Samgye-dong, Gimhae-si (Gagyo Corporation, 2019)

| Classification | | Specification | | Notes |
|--------------------------|--------------------------|---------------|-------|-----------------------------|
| | | SSG1 | SSG2 | |
| Invert elevation (El. m) | | 0.0 | 0.0 | |
| Sediment control zone | Invert elevation (El. m) | 0.0 | 0.0 | Including freeboard (0.3 m) |
| | Maximum depth (m) | 1.5 | 1.7 | |
| | Bottom area (m²) | 80 | 156 | |
| | Top area (m²) | 152 | 264 | |
| | Storage (m³) | 174 | 357 | |
| Flood control zone | Invert elevation (El. m) | 1.5 | 1.7 | Outfall invert El. |
| | Maximum depth (El. m) | 2.4 | 2.4 | High water level |
| | Top area (m²) | 204 | 315 | |
| | Bottom area (m²) | 152 | 264 | |
| | Storage (m³) | 160 | 202 | |
| Crest | Surcharge depth (El. m) | 2.7 | 2.7 | Including freeboard (0.3 m) |
| | Total storage (m³) | 224 | 300 | |
| | Total area (m²) | 210 | 338 | |
| Side slope | | 1 : 1 | 1 : 1 | Vertical : horizontal |
| Main spillway (mm) | | Φ300 | Φ400 | 1 |

Fig. 9는 각각 SSG1 및 SSG2 저류지의 계획 빈도(30년 빈도)에 대하여 금회 개발된 프로그램에 의해 분석된 결과이다. 이때 적용된 저류지 유입량은 저류지 설계에 사용되었던 시계열(수문곡선) 자료이다. 분석 결과, 두 저류지 모두 약 0.02 m/s의 침투유량 저감 효과가 나타나는 것으로 분석되었고, 약 30 cm의 여유고가 있는 것으로 검토되었다. Table 2는 분석된 결과를 수치적으로 비교하기 위해 나타낸 표이다. Gagyoo Corporation (2019)의 설계 결과와 금회 개발 프로그램에 의한 분석 결과는 대체로 유사한 결과를 보였다. 하지만 상대적으로 단순 산식을 이용하여 분석한 기존 설계 결과보다는 완성도 높은 수리학적 이론 식을 적용하고, 오랜 기간 검증하여 사용되고 있는 SWMM을 이용한 금회 분석 결과가 보다 신뢰적일 것으로 판단된다.

3.2 침투 저류지에 대한 적용성 평가

개발된 저류지 규모 산정 프로그램에 의한 침투 저류지 설계의 적절성을 평가하기 위해 제주시 판포리에 계획된 침투 저류지에 적용하였다. 제주시 판포리에 계획된 침투 저류지의 설계 체원과 설계침투량은 Table 3과 같다. 저류지 저면을 통한 침투량 산정 방법은 기존 설계 방법과 금회 개발된 프로그램 간에 차이가 있다. Kyoungrim Corporation (2017)에서는 비침투량 공식을 이용하여 저류지 저면을 통한 침투량을 유량의 단위로 직접 산정하였지만, 본 연구에서 개발된 저류지 규모 산정 프로그램은 Green-Ampt 식을 사용하기 때문에 관련된 매개변수의 추정이 요구된다. 이에 연구에서는 Rawls

et al. (1983)을 참조하여 제주 지역의 투수성을 고려하여 투수 계수가 가장 큰 토양인 모래(sand)에 해당하는 투수계수 120.4 mm/hr와 흡인수두 49.02 mm로 설정하였고, 초기 함수비 부족 분은 설계에 활용됨을 감안하여 0.1로 설정하였다.

Fig. 10은 침투 저류지의 계획 빈도에 해당하는 50년 빈도 홍수 수문곡선에 대한 분석 결과를 나타낸다. 제주시 판포리에 계획된 침투 저류지의 경우, 별도의 방류부가 존재하지 않기 때문에 방류량 그래프는 나타나지 않았다. 50년 빈도에 대하여 모의된 저류지의 최대 수심은 2.12 m로 산출되었고, 이에 따른 침투 저류지의 여유고는 0.88 m로 산정되었다. Kyoungrim Corporation (2017)에서 계획한 홍수위(50년)에 대한 저류지의 여유고는 0.9 m (Table 3)로서, 금회 분석한 결과와 유사한 것으로 나타났다.

금회 개발된 저류지 규모 산정 프로그램과 Kyoungrim Corporation (2017)에서는 동일한 저류지 유입 수문곡선을 이용하였고, 상기의 침투 저류지는 별도의 방류가 없이 전량 지반으로 침투되는 형태이다. 따라서 두 분석 결과의 차이는 곧 침투량의 차이를 의미한다. 개발된 저류지 규모 산정 프로그램에서는 Green-Ampt 식에 의해 침투량이 결정되는 반면, Kyoungrim Corporation (2017)에서는 비침투량을 이용하여 침투량이 결정되었다. 상기의 분석 결과에 의한 저류지 수위의 차이는 2 cm로서 크지 않다. 따라서 Green-Ampt 식을 이용한 침투 저류지의 설계가 가능할 것으로 판단된다. 다만, 금회 분석 결과만으로 두 방법이 항상 동일한 결과를 도출하는 것으로 결론 내릴 수는 없으므로 관련된 연구가 요구된다.

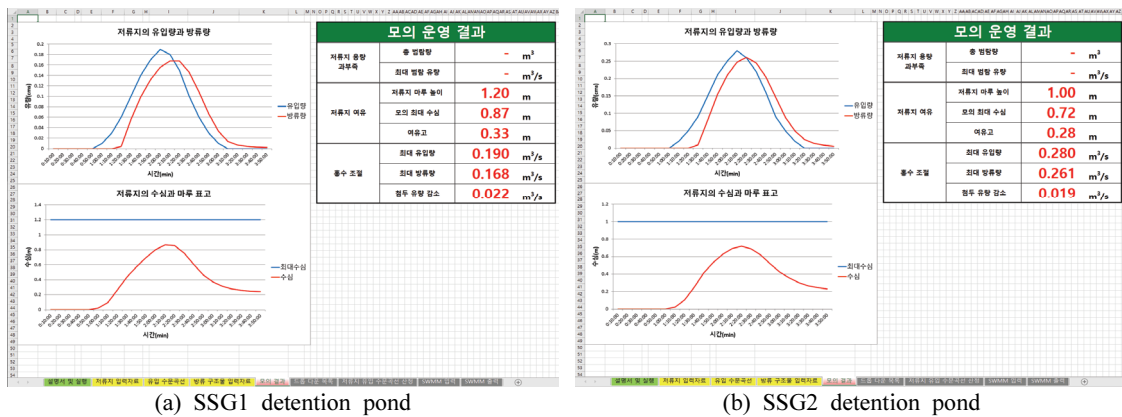


Fig. 9. Analysis Results for the Detention Ponds by the Program

Table 2. Validation of the Program for Design of Detention Ponds

| Classification | | Design report (Gagyoo Corporation, 2019) | The program developed in the study | Note |
|----------------|-----------------------------|--|------------------------------------|------|
| SSG1 | Maximum water level (El. m) | 2.35 | 2.37 | |
| | Maximum discharge (m³/s) | 0.16 | 0.168 | |
| SSG2 | Maximum water level (El. m) | 2.44 | 2.42 | |
| | Maximum discharge (m³/s) | 0.24 | 0.261 | |

Table 3. Design Specification of Permeable Detention Pond (Kyounggrim Corporation, 2017)

| Classification | | Specification | Note |
|--|---------------------------------|--|--|
| Bottom | Invert elevation (El. m) | 38.5 | |
| | Bottom area (m ²) | 383.0 | |
| Sediment control zone | Depth (m) | 0.3 | |
| | Top elevation (El. m) | 38.8 | |
| | Storage (m ³) | 123.4 | |
| Flood control zone | Depth (m) | 1.2 | |
| | | 40.6 | High water level (50-year frequency) |
| | Top elevation (El. m) | 41.0 | Extreme flood level (200-year frequency) |
| | | 1,146.4 | High water level (50-year frequency) |
| Storage (m ³) | 1,510.7 | Extreme flood level (200-year frequency) | |
| | Freeboard (m) | 0.9 | High water level (50-year frequency) |
| | | 0.5 | Extreme flood level (200-year frequency) |
| Crest | Invert (El. m) | 41.5 | Elevation of levee |
| | Total depth (m) | 3.0 | |
| | Total storage (m ³) | 2,154.0 | Including freeboard |
| | Total area (m ²) | 1,114.0 | Top area |
| Side slope | | 1 : 2 | Vertical : horizontal |
| Design infiltration rate (m ³ /sec) | | 0.09464 | Infiltration through the bottom |

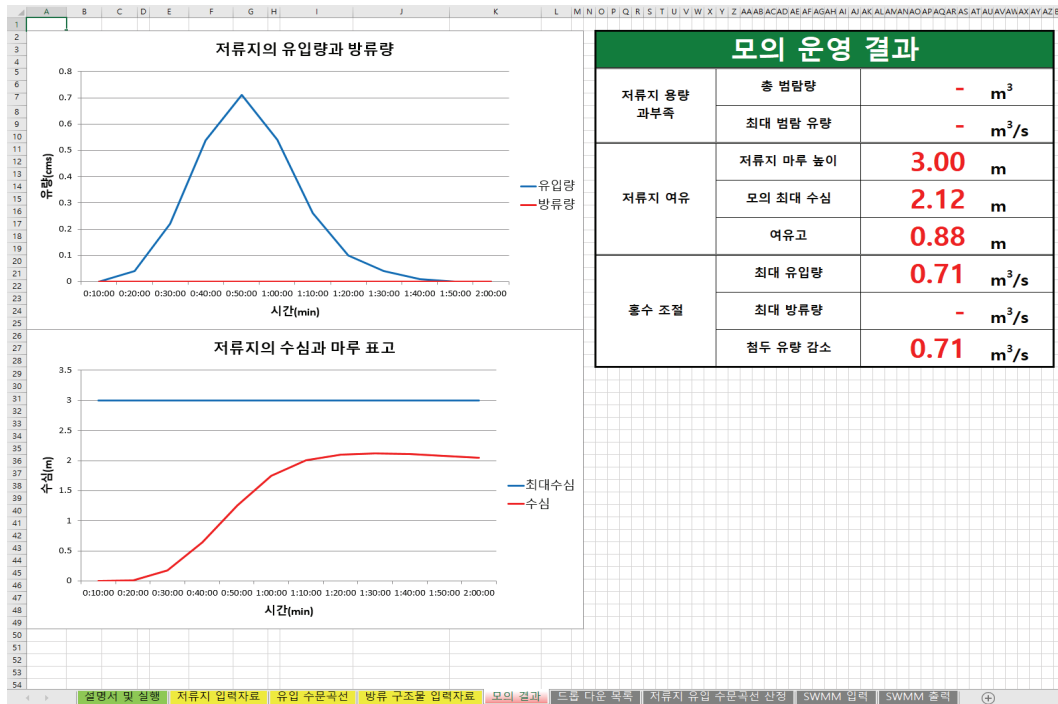


Fig. 10. Analysis Results for a Permeable Detention Pond by the Program

3.3 합리식 수문곡선 적용에 대한 검토

개발된 저류지 규모 산정 프로그램의 저류지 유입 수문곡선 입력 방법은 두 가지이다. 즉, 유입 수문곡선을 직접 입력하는 방법과 합리식 수문곡선을 이용하는 방법이다.

합리식 수문곡선 방법의 적용성을 검토하기 위해 김해시 삼계동에 계획된 2개의 저류지에 적용하였다.

합리식 수문곡선 방법을 이용하기 위해서는 침투유량, 도달시간, 감수부 계수가 결정되어야 한다. 본 연구에서는

침투유량과 도달시간 산정에 Gagy Corporation (2019)의 설계자료를 이용하였다. 하지만 감수부 계수는 직관적인 추정이 어렵다. 다만, 일반적인 수자원계획에서는 확률강우량의 시간 분포를 Huff 3분위로 적용하고(MLTM, 2011; MPSS, 2016), 홍수 수문곡선은 강우주상도의 형상에 영향을 받음을 고려하였다. 즉, 본 연구에서는 Huff 3분위 형태의 수문곡선을 고려하였고, 이에 따라 감수부 계수는 0.6~0.7 범위에 있는 것으로 판단하였다.

감수부 계수 값의 적용에 따른 저류지 설계 분석 결과를 검토하였다. Table 4는 김해시 삼계동에 계획된 2개의 저류지(SSG1, SSG2)에 합리식 수문곡선 방법을 적용한 결과로서, 이때 적용된 감수부 계수는 0.60, 0.65, 0.70을 적용하였다. 우선, 감수부 계수의 적용에 따른 결과의 차이는 매우 미미하였다. 그리고 합리식 수문곡선 방법을 적용한 결과는 저류지 유입 수문곡선을 직접 입력하여 분석한 결과와 매우 유사한 것으로 분석되었다. 따라서 합리식 수문곡선 방법의 적용이 가능한 것으로 판단되고, 이에 따라 우수 관거 설계 시 분석되는 합리식에 의한 침투유량을 이용한 저류지 계획이 가능할 것으로 판단된다.

한편, 홍수 수문곡선을 직접 입력한 Fig. 9와 합리식 수문곡선 방법을 적용한 Fig. 11의 저류지 유입 수문곡선을 비교해 보면, 침투부 이전 상승부의 유입량에서 차이가 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 강우-유출 모형 분석을 통해 결정된 홍수량은 일정 시간 동안 유량이 나타나지

않지만, 합리식 수문곡선 방법에서는 수문곡선의 침투부와 시작점의 유량을 직선으로 연결하기 때문에 이러한 영향이 고려되지 않는다. 금회 연구에서는 이러한 차이가 저류지 계획에 큰 영향을 주지 않는 것으로 분석되었지만, 상황에 따라 다른 결과가 초래될 수 있을 수 있으므로 다양한 형태에 대한 추가적인 검증이 요구된다.

4. 결론

본 연구에서는 엑셀 기반의 저류지 규모 산정 프로그램을 개발하였다. 엑셀 기반으로 구성되었기 때문에 저류지 모의에 필요한 자료 입력의 편의성이 높고, 그래프와 표를 통해 모의 결과를 쉽게 확인할 수 있는 장점을 가진다. 그리고 SWMM의 엔진을 이용하여 저수지 추적을 수행함에 따라 다양한 방류 구조물을 고려한 수리학적 계산을 안정적으로 수행할 수 있고, Green-Ampt 식을 이용한 침투 저류지의 설계가 가능하다. 추가적으로, 우수 관거 계획과 저류지 계획의 연계를 고려하여 합리식 수문곡선 방법에 의한 홍수 수문곡선의 유도 방법이 고려되었다.

개발된 저류지 규모 산정 프로그램의 적절성 평가를 위해 실제 사업지구의 저류지 계획에 적용하였다. 적용된 저류지는 2개소의 일반 저류지와 1개소의 침투 저류지이고, 실제 설계자료가 활용되었다. 그 결과, 실제 사업지구의 저류지 계획과 유사한 결과가 도출되었고, 이를 통해 개발된 프로그

Table 4. Validation of Rational Method Hydrograph

| Classification | Design report | The program developed in the study | | | | Note |
|----------------|---------------------------------------|---|----------------------|-------|-------|------|
| | | Hydrograph by design report (time series) | Receding limb factor | | | |
| | | | 0.60 | 0.65 | 0.70 | |
| SSG1 | Maximum water level (El. m) | 2.35 | 2.37 | 2.38 | 2.38 | |
| | Maximum discharge (m ³ /s) | 0.16 | 0.168 | 0.169 | 0.169 | |
| SSG2 | Maximum water level (El. m) | 2.44 | 2.42 | 2.42 | 2.42 | |
| | Maximum discharge (m ³ /s) | 0.24 | 0.261 | 0.259 | 0.260 | |

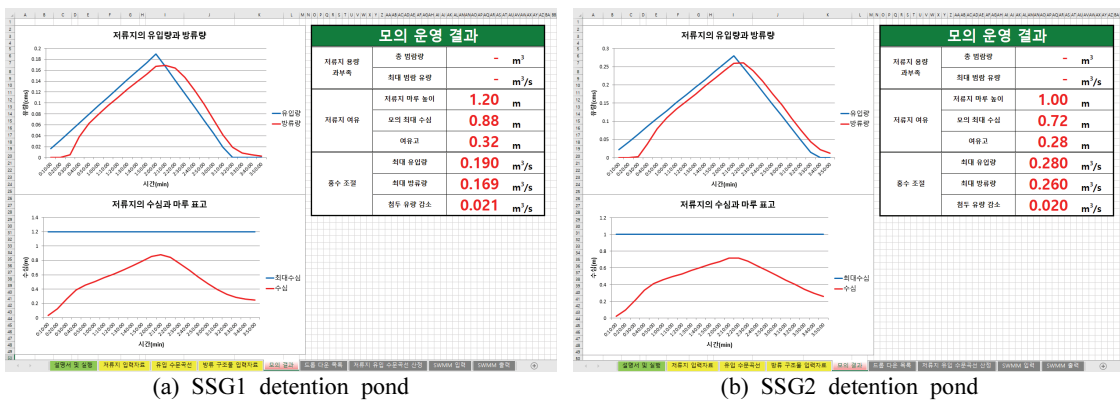


Fig. 11. Application of Rational Method Hydrograph (Receding limb factor: 0.65)

램에 의한 저류지 규모 산정은 적절한 것으로 판단되었다. 또한, 합리식 수문곡선 방법에 의한 홍수 수문곡선의 유도 및 Green-Ampt 식을 이용한 침투 저류지 계획의 적절성도 검토되었다. 다만, 합리식 수문곡선 방법은 홍수 수문곡선의 상승부에 대한 정확도 개선과 Green-Ampt 식을 이용한 침투 저류지 계획에서는 실제 현상에 대한 실증적 검증이 필요한 것으로 판단되었다.

본 연구에서 개발된 엑셀 기반의 저류지 규모 산정 프로그램은 개선 및 업데이트가 용이하고, 프로그램의 연계에서도 제약이 적다. 따라서 유사한 프로그램간 연계를 통해 활용성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 논문은 행정안전부 극한 재난대응 기반기술 개발사업의 일환인 “해안가 복합재난 위험지역 피해저감 기술개발 (연구과제번호: 2018-MOIS31-008)”의 지원으로 수행되었습니다.

References

Bedient, P.B., and Huber, W.C. (2002). *Hydrology and floodplain analysis* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall.

Cleveland, T.G., Thompson, D.B., and Fang, X. (2011). *Use of the rational and modified rational method for hydraulic design*. Report No. FHWA/TX-08/0-6070-1, Texas Tech University.

Gagy Corporation. (2019). *Small scale disaster impact assessment according to development of detached housing site in Samgye-dong, Gimhae-si*.

Green, W.H., and Ampt, G.A. (1911). Studies on soil physics. *Journal of Agricultural Science*, Vol. 4, No. 1, pp. 1-24.

Guo, J.C. (2001). Rational hydrograph method for small urban watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 352-356.

Huber, W.C., and Dickinson, R.E. (1992). *Storm water management model, Version 4: User's manual*. EPA/600/3-88/001a, U.S. Environmental Protection Agency, Athens, Georgia.

Ionescu, C.S., and Nistoran, D.E.G. (2019). Influence of reservoir shape upon the choice of hydraulic vs. hydrologic reservoir routing method. *E3S Web of Conferences*, Vol. 85, p. 07001.

Kim, M.H., and Park, J.Y. (2011). Improvement of design method of detention storage with weir in urbanized

area. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 12, No. 4, pp. 266-275.

Kim, M.H., Go, M.S., and Song, C.S. (2011). Determination of detention storage volume by rainfall intensity. *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, Vol. 12, No. 1, pp. 64-70.

Korea National Housing Corporation. (1997). *A study on the design techniques of the detention facility*.

Kyounggrim Corporation. (2017). *Pre-disaster impact assessment according to development of Kyounggrim No. 1 solar photovoltaic power station*.

Maracineanu, F., Cazanescu, S., and Constantin, E. (2009). Water management models for surface drainage. *Bulletin UASVM Horticulture*, Vol. 66, No. 2. pp. 549-556.

Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). (2011). *Improvement and complementary research for probability rainfall*.

Ministry of Public Safety and Security (MPSS). (2016). *Preliminary disaster impact assessment consultation practical guidelines*.

Ministry of Public Safety and Security (MPSS). (2017). *Criteria about types, structures, installation and maintenance of facilities for rainfall-runoff reduction*.

Oh, G.H., Park, K.B., and Chang, I.S. (2008). Study of process for flood detention location and storage capacity. *Journal of Environmental Science International*, Vol. 17, No. 6, pp. 601-609.

Park, M., Yoo, C., and Park, C. (2007). Comparative study on preliminary design of detention basins. *Proceedings of 2007 Annual Conference*, Korea Water Resources Association, pp. 383-387.

Rawls, W.J., Brakensiek, D.L., and Miller, N. (1983). Green-Ampt infiltration parameters from soils data. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 109, No. 1, pp. 62-70.

Rossman, L.A. (2009). *Storm water management model: User's manual, Version 5.0*. EPA/600/R-05/040, National Risk Management Research Laboratory, Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

Seoul Metropolitan City. (2013). *Master plan for rainwater management in Seoul (complementing) - Guideline*.

| | |
|----------|------------------|
| Received | February 4, 2020 |
| Revised | February 5, 2020 |
| Accepted | March 3, 2020 |