

지하저류조 신설에 따른 우수 유출량 저감

송창근* · 서일원** · 정영재***

Song, Chang Geun*, Seo, Il Won**, Jung, Young Jai***

Reduction of Rainfall Runoff by Constructing Underground Storage Tank

ABSTRACT

In this study, reservoir routings for 1 hour-50 year precipitation frequency were carried out at the Engineering Water Fall and the Amphitheater located at the downstream of Seoul National University Dam. Main analysis was focus on the following matters: (1) storage amount by the tank; (2) reduction of the outflow and the peak water surface elevation; (3) change of phase lag time; and (4) design of new boxes at the inlet and outlet of storage tank. As for the storage tank of 25,000 m³ built in the Amphitheater area, the tank induced 49.43 % storage effect, 28 min. phase lag time, and reduced the peak outflow by 49.64 %. In addition, the peak water surface elevation was lowered by 35 cm compared with that of 15,000 m³ storage tank. It is concluded that combined management of previous storage facility and new underground storage tank would control the excessive rainfall runoff efficiently.

Key words : Reservoir routing, Underground storage tank, Reduction of outflow, Box design

초록

본 연구에서는 서울대학교 댐 하류 노천강당 유역과 공대폭포 유역에 지속시간 1시간 50년 빈도 강우에 관한 저수지 홍수추적을 실시하고 지하저류조가 설치되는 경우 다음의 사항에 초점을 맞추어 분석을 수행하였다 (1) 저류조의 저류량; (2) 우수유출량 및 침투수위의 저감정도; (3) 체시시간 변화; (4) 신설 지하저류조의 유출입부 암거 설계. 노천강당 유역에 25,000 m³ 저류조가 설치되는 경우 총 유입량 대비 49.43 %의 저류효과가 발생하고 49.64 %의 침투 유량 감소효과와 28분의 체시시간 증대효과를 얻을 수 있었으며, 침투 수위는 15,000 m³ 저류조에 비해 35 cm 낮게 나타났다. 기존 저류시설과 신설 지하저류조의 공동 운영을 통해, 홍수 발생 시 댐 유역에서 초과되는 유출량을 탄력적으로 관리할 수 있는 것으로 판단된다.

검색어 : 저수지 홍수추적, 지하저류조, 유출량 감소, 암거 설계

1. 서론

최근 이상기후의 발생과 기상이변 등으로 인해 우리나라의 강수량은 증가하는 추세이나, 강우일수는 급격히 줄어들고, 강우강도는 점점 높아지고 있다 (Green Growth Korea와 Korea Meteorological Administration, 2011). 따라서 기존의 계획빈도를 초과하는 강우와 유출로 인해 많은 인명 피해와 경제적 손실이 발생하고 있다. 또한 도시화에 따라 유역의 불투수면이 증가하고 자연저류 및 침투능력이 감소되어 강우에 따른 유출 발생률이 커지며 하수관거와 자연수로 정비 또는 암거화에 따라 물의 유속이 빨라지는 경향이

* 정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사 후 연구원 (bay680@snu.ac.kr)

** 정희원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (Corresponding Author · Seoul National University · seoilwon@snu.ac.kr)

*** 콜로라도 주립대학교 토목환경공학과 박사과정 (yjung1984@gmail.com)

Received September 6 2012, Revised November 10 2012, Accepted March 18 2013

발생한다. 따라서 홍수도달시간이 짧아지며 침투 유출량과 총 유출량이 증가하고 기저유출이 감소하게 된다 (Wanielista와 Yousef, 1992). 이는 홍수의 위험도가 커지는 것을 의미하여 예상치 못한 강우가 발생하는 경우 그에 따른 범람과 함께 경제적 홍수 피해 정도가 커짐을 의미한다. 따라서 기존에 제시되어 왔던 우수지 설치나 관거 정비 등의 지속적인 관리와 함께 보다 다양한 대안이 필요한 실정이다 (Lee, 2006).

우수저류시설은 강수 시 빗물을 저류시켜 홍수량을 줄이고 유역의 물 함유기능을 적절하게 유지시켜 유출량을 저감하여 도시 물 순환을 개선하는 시설을 의미한다. 이 시설은 우수배제를 위한 배수관망 용량을 상향조절하기 어려운 지역에 설치되어 기존 우수 배수시설을 그대로 유지하는 상태에서 우수유출을 저감할 수 있는 장점이 있다. 따라서 지역 내 저류시설은 토지 이용 계획상 우수저류가 가능한 경우에 저류시설로 배치해 유출량을 조절하여 도시지역의 불투수역 증대로 인한 도시형 홍수를 방지하는 역할을 하며 최근 자연 환경 복원을 통한 환경 친화적 기술로 발전하고 있다 (Lee, 2005). 우수저류시설 중 도시유역의 우수배제를 위해 사용되는 저류조는 강수 시 순간 유출량을 감소시켜 홍수기 유출에 의한 저지대 침수를 방지하는 효과를 얻을 수 있다. 또한 저류조에 확보된 수량을 살개천을 통해 연중 소량 흘러보내 물과 함께하는 산책로를 조성할 수 있으며, 최근 들어 친수공간에 대한 요구도가 늘어남에 따라 분수나 폭포 등의 친수용수로의 활용이 증가하고 있으며, 특히 지하에 설치된 저류조의 경우 지표면을 공원, 녹지 등 친환경 시설로 이용할 수 있는 장점이 있다.

국내의 우수 유출 저감시설에 대한 연구는 1990년대 초반부터 시작되었으나 계획강우의 임계지속시간을 결정하는 연구와 같은 수문학적 저류지 설계를 위한 내용이 주를 이루었다. 2000년대 이후 수해방지와 환경보존의 중요성이 부각되면서 우수유출량 저감시설에 관한 활발한 연구가 다방면에서 진행되고 있다. Yoon과 Lee(2001)은 저류비의 개념을 이용하여 산정된 저류지 용량과 강우지속시간에 따른 저류지의 최대 용적을 비교, 분석하여 저류지 설계 시 적정용량을 산정하는 방법을 제안하였고, Lee 등(2004)은 SWMM 모형을 이용하여 재현기간별 설계강우에 대한 유출을 모의한 후 월류수 수질이 건기시의 수질로 회복되는 시점까지의 유출을 저류조의 용량으로 산정하는 방법을 제안하였다. Lee와 Kim(2008)은 홍수방어용 저수지의 설계빈도인 50년 빈도 강우에 대하여 세 가지 가상영역에서 저류지를 유역 내의 임의의 위치에 설치하여 저류지가 분담하는 유역의 면적비와 위치 관련 변수를 수문학적으로 분석하고, 저류지의 위치에 따른 유출저감효과와 위치선정에 관한 연구를 수행하였다. Lee와 Kwak(2008)는 저류지 유입 및 유출량을 바탕으로 침투유량비, 저류비, 방류구조물 직경, 저류지 최대허용수심 등의 설계변수를 이용하여 저류지 간편설계

기법을 제시하였다. Kim 등 (2010)은 SWMM 모형을 적용하여 2003년 태풍 매미 사상에 대한 대구광역시 비산동의 유출해석을 실시하고 지하저류조의 유무 및 용량에 따른 침수피해 저감효과를 분석하였다. Ryu와 Lee (2012)는 지하저류조의 설치 개수에 따른 최적 위치와 규모를 선정하기 위하여 유전자 알고리즘과 SWMM 5.0 DLL을 연계하여 지하저류공간 해석 모형을 구성하고 서울시 상내배수분구에 적용하여 강우 사상 및 설치 개수에 따른 효과를 분석하였다. 이상의 연구들을 살펴보면 저류지 설계를 위한 저수용량 결정 및 위치 선정과 SWMM모형을 이용한 유출 모의 등에 관한 연구는 상당부분 진행되었으나, 국내의 경우 저류지 유출입부 암거 설계에 관한 연구와 홍수추적의 근간을 이루는 저수지 추적 이론을 단계별로 직접 적용하여 우수유출량 저감효과에 관한 분석에 주안점을 둔 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 서울대학교 댐 하류 노천강당 유역과 공대폭포 유역에 지속시간 1시간 50년 빈도 강우에 대한 저수지 홍수추적을 실시하고 치수목적으로 지하저류조 (Underground Storage Tank, UST)가 설치되는 경우 저류조의 저류량, 우수유출량의 저감정도, 침투 수위 감소 및 지체시간 확보 등의 효과를 분석하고, 신설 지하저류조의 유출입부 암거를 설계하였다.

2. 이론적 연구

2.1 지하저류조 및 암거

암거 내 흐름은 암거의 크기, 모양, 경사 및 조도, 입구부와 출구부의 기하학적 성질, 암거의 상류수심과 하류수심 등에 따라 개수로나 관수로의 흐름 특성을 보이며, 관수로 흐름의 경우 부분관류 혹은 만수관류 상태로 흐름 수 있다. 따라서 암거 내 흐름의 해석은 대단히 복잡하므로 설계에 있어서도 여러 가지 경우를 고려해야 한다. 암거 내 흐름은 암거 상류부 수심과 암거 높이에 따라 개수로 조건과 관수로 조건으로 구분되며, 한계경사와 암거 경사의 조건에 따라 상류와 사류의 흐름이 나타난다 (Lee, 2011; Federal Highway Administration, 1985). 우수 배수 암거의 경우 배제할 수 있는 홍수량을 초과한 유량이 암거로 유입되면 관수로의 흐름이 발생하고 암거에 부압이 작용하여 벽면부에 파손이 일어나므로 원활하지 못한 방류에 의해 상류부에 수체의 정체현상이 발생하는 등 암거가 가지고 있는 고유의 기능이 발휘되지 못하게 된다. 따라서 본 연구에서는 암거의 단면 설계 시 개수로의 흐름을 유지하도록 하였다. 또한 암거의 경사는 0.2% 이상을 원칙으로 하고 토사의 침전과 마모 등을 방지하기 위해 평균 유속이 0.8-3.0 m/s의 범위가 되도록 제시하고 있으며 설계 통수량은 최대 통수량의 80%가 되도록 권장하고 있으므로 (Korea Expressway Corporation, 2001) 이상의 사항도 고려하여 설계에 반영하였다.

개수로의 평균 유속 및 유량공식은 오래 전부터 많은 식이 제안되었으나 본 연구에서는 계산이 비교적 간단하고 많은 연구자들에 의해 신뢰성이 검증된 아래와 같은 Manning 공식을 사용하였다.

$$V = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_f^{1/2} \quad (2)$$

위 식에서 V 는 평균 유속 (m/s), n 은 Manning 계수, R_h ($= A/P$)는 동수반경 (m), S_f 는 수로의 종단 경사 (m/m), Q 는 배수량 (m^3/s), A 는 통수단면적 (m^2), P 는 수로 횡단면에 있어서 물이 접하고 있는 부분의 길이인 윤변 (m)을 의미한다. 본 연구에서는 Manning 공식을 사용하여 암거 내의 평균유속과 유량을 계산하였으므로, 물리적인 의미에서 댐이나 지하저류조로부터 방류되는 침투 유출량을 기준으로 등류계산을 수행한 것으로 해석할 수 있다.

2.2 저수지 추적

홍수추적(flood routing)은 하천구간이나 저수지를 통하여 이동하는 물(수문곡선)의 시공간적인 변화(수심 또는 유량)를 저류와 흐름저항을 고려하여 예측하는 수학적 기법이다. 저수지 추적(reservoir routing)은 유입수문곡선, 초기조건, 저수지 특성 및 조작규정이 주어진 조건에서 저수지로부터 방류되는 유출수문곡선을 계산하는 과정이다. 저수지추적의 개념은 저수지의 저류효과를 이용하여 유입량에 대한 유출량 감소 효과를 분석하는 것이다. 이 감소를 유발하는 저류량은 유입체적과 유출체적의 차이가 된다. 이를 시간에 대한 변화량인 유량의 향으로 나타내면 유입유량 I 와 유출유량 Q 의 차이는 저류량의 변화 $\Delta S/\Delta t$ 와 같다.

$$I - Q = \frac{\Delta S}{\Delta t} \quad (3)$$

위의 식을 작은 시간 간격 Δt 에 대한 평균유입량과 평균유출량 및 저류량의 변화로 표현하고 기지의 값을 좌변으로 정리하면 아래와 같다.

$$\frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t + \left(S_1 - \frac{1}{2} Q_1 \Delta t \right) = S_2 + \frac{1}{2} Q_2 \Delta t \quad (4)$$

위 수식을 이용하여 댐 하류로 방류되는 유출수문곡선을 구하기 위해서는 유입수문곡선, 저류량-유량관계(저류량 지시곡선), 저류량 S_1 과 방류량 Q_1 의 초기값, 추적기간 Δt 이 필요하다. 앞 단계에

서 구한 관계 곡선들을 이용한 저수지 추적과정은 다음과 같다 (Eagleson, 1970).

- (1) 평균 유입량 계산: $(1/2)(I_1 + I_2)\Delta t$
- (2) 초기값 또는 전 단계의 S_1 과 Q_1 을 이용하여 $S_1 - (1/2)Q_1 \Delta t$ 을 계산
- (3) (1) 단계 및 (2) 단계의 결과를 이용하여 수식 (4)의 좌변 계산
- (4) 저류량 지시곡선으로부터 수식 (4)의 $S_2 + (1/2)Q_2 \Delta t$ 에 해당하는 Q_2 결정
- (5) 저류량-유량관계로부터 Q_2 에 대한 S_2 결정

I_2, S_2, Q_2 를 다음 단계의 I_1, S_1, Q_1 의 새로운 값으로 하여 유출수문곡선이 완전히 얻어질 때까지 위의 5단계를 반복한다. 유입량을 평균하는 과정에서 $(1/2)(I_1 + I_2)\Delta t$ 가 사용되어 선형가정을 하였으므로, 이를 만족하기 위해서는 Δt 를 충분히 작게 취해야 한다.

3. 대상 유역 및 저류조 설계

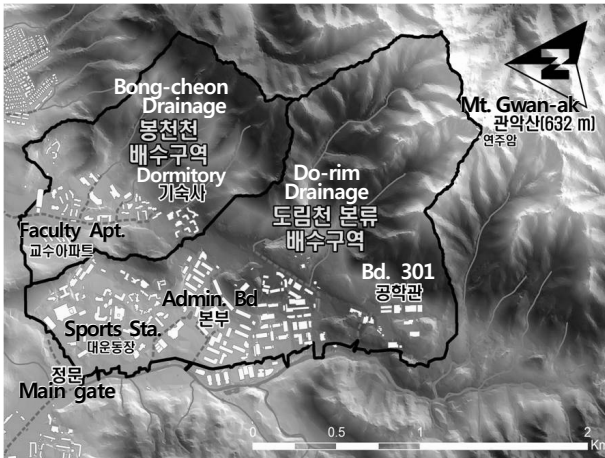
3.1 대상유역

서울대학교 관악 캠퍼스 내에는 우수처리를 위해서 댐, 집수거, 박스 암거, 원형관로, 우수관 등 다양한 수방 시설물들이 운영되고 있다. 도림천 상류 유역에 내린 강우는 순환도로 상류계곡에 위치한 댐, 지진관측소 집수거, 신공학관 집수거와 캠퍼스 내 우수관을 통해 집수되고, 캠퍼스 내에 고르게 분포된 5개의 박스 암거를 통해 배수가 이루어져 도림천으로 방류된다. 서울대 관악캠퍼스로부터 도림천으로 배수되는 배수구역의 총 면적은 약 4.0 km^2 로 도림천 전체 유역 면적의 약 8%를 차지한다. 이 중 도림천 본류로 흘러가는 면적은 약 2.7 km^2 , 도림천의 지천인 봉천천으로 흘러가는 면적이 약 1.3 km^2 를 차지한다 (Figure 1(a)). 관악 캠퍼스 내에 설치되어 있는 집수 및 배수 시설, 우수관 분포 현황을 Figure 1(b)에 모식도로 나타냈다. 본 연구에서는 관악캠퍼스 상류유역 중 우천 시 다량의 우수가 유입되는 댐 하류 노천강당(Amphitheater) 유역과 공대폭포(Engineering Waterfall) 유역을 선정하여 유출량 저감 및 지체시간 확보를 위한 지하저류조의 효과를 분석하였다.

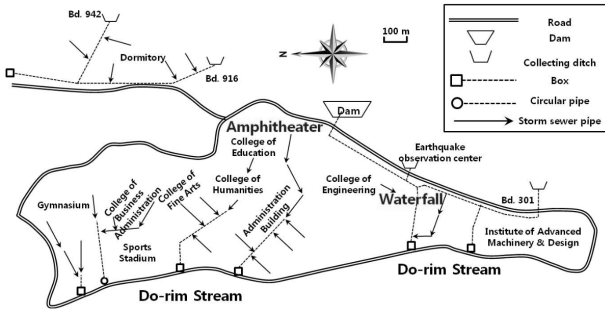
3.2 홍수량 산정

본 연구에서는 확률 강우량 산정을 위해 관악 관측소의 강우량 자료를 사용하였다. 관악 관측소는 1992년 9월에 관측을 개시하였지만, 초기 자료 누락으로 인해 분석이 유효한 1997년 이후의 자료를 이용하였다.

서울대학교 관악캠퍼스 및 관악산 인접영역에 대한 1:5,000



(a) Drainage areas

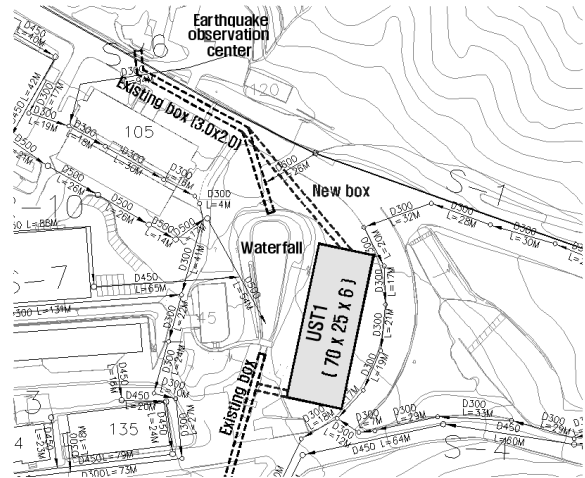


(b) Rainwater discharge system

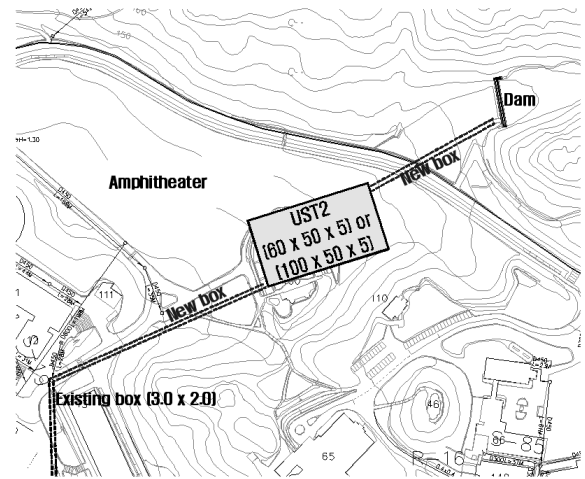
Fig. 1. Drainage areas and Rainwater discharge system in Seoul National University (Seo et al., 2012)

축척의 수치고도모형(DEM), 하천도, 하수관거도, 유역 특성인자 등의 지리정보체계 자료를 활용하여 배수분구도를 작성하고, 5개의 강우 지속 시간(10분, 30분, 1시간, 3시간, 6시간)과 4개 빈도의 강우량(10년, 20년, 50년, 100년) 각각의 사상에 대한 유효 강우량 및 유출량을 산정하였다(Seo 등, 2012). 유출특성 조건에 따른 강우량과 유출량의 관계를 미리 설정하여 사용하며 미세측유역의 유효우량 산정에 이용되는 SCS (Soil Conservation Service method) 방법과 HEC-HMS 모형(Hydrologic Modeling System)을 사용하여 빈도별 홍수량을 산정하고 그 결과를 비교하여 모형을 검증하였다. 설계강우의 시간분포는 Huff의 4분위법을 이용하였다.

서울대학교 캠퍼스 내의 우수 유출을 분석하기 위해서는 상류에 위치해 있는 캠퍼스 내의 여러 주요 지점들에서의 유출량이 필요하므로 Seo 등 (2012)에서 작성한 배수분구도를 바탕으로 우수 시 관악산으로부터 캠퍼스로 다량의 유출이 발생하여 피해의 주원인이 되는 댐 지점과 지진관측소 지점에서의 유출량을 산정하고 이 지점에 매우 인접한 공대폭포와 노천강당에 위치한 지하저류조 유입량을 결정하였다. 그 결과 공대폭포 유역은 지속시간 1시간 기준으로 재현기간에 따라 10년 빈도 강우의 경우 10.6 m³/s부터



(a) UST1



(b) UST2

Fig. 2. Layout of installation of underground storage tank

100년 빈도 강우의 경우 17.3 m³/s까지 나타났으며, 노천강당 유역에서는 지속시간 1시간 기준으로 재현기간에 따라 10년 빈도 강우의 경우 14.7 m³/s, 100년 빈도 강우의 경우 24.1 m³/s로 계산되었다. 본 연구에서는 서울대학교 상류에 위치한 관악산의 계곡 경사가 급하고 서울대학교 캠퍼스 내로 유입되는 유달시간이 짧은 특성을 고려하여 지속시간 1시간 50년 빈도 홍수량에 대한 저류조 효과 분석을 수행하였다. 지속시간 1시간 50년 빈도 침투 홍수량의 경우 공대폭포유역은 15.2 m³/s, 노천강당 유역은 21.2 m³/s로 산정되었다 (Seo 등, 2012).

3.3 지하저류조 설계

본 연구에서는 2개의 지하저류조 설치를 검토하였다. 우선 첫 번째로 지진관측소 하부에 위치한 폭포 저수지가 범람하는 것을 방지하기 위해, 공대폭포 유역에 지하저류조 (UST1)를 신설하는

방안을 검토하였다. 댐에서 공대폭포 유역으로 유출되는 기존 압거를 폐쇄한다고 가정하여 물길을 인위적으로 변화시킨 것에 따른 피해를 줄이고 폭포 저수지로 유입되는 수량을 감소시키고자 하였다. 공대 폭포 옆의 공터에 지하저류조를 건설하는 경우, 댐 유역에서 유출되는 우수를 폭포 저수지와 지하저류조에 적절히 배분하여 관리하는 방안을 설계하였다. 10,500 m³ 규모 지하저류조의 크기는 수치지도를 이용하여 저류조가 설치될 수 있는 공터의 치수를 바탕으로 길이 70 m, 너비 25 m, 율류위어 6 m로 하였다 (Figure 2(a)). 지하저류조 및 기존 공대폭포 저수지의 효율적인 활용을 위해, 댐 하류 압거를 높이 0 m - 0.25 m 까지는 공대폭포 저수지로 물이 유입되고, 0.25 m - 2.0 m 까지는 신설 지하저류조로 들어가도록 설계하였다. 연결수로 및 압거에 대한 세부적인 제원과 개념도는 4.1절 및 4.2절에 상술하였다. 이러한 설계 방식을 통해, 강우량이 적어 댐 하류 유출량이 적은 경우에는 기존 공대폭포 저수지만을

이용하여 통수시키고, 강우가 지속되어 유출량이 증가하게 되면 우수가 지하저류조로 흘러 들어가게끔 하여 유출을 지체시키는 효과를 기대할 수 있다.

두 번째로 댐에서 방류되는 우수를 인위적으로 우회시키지 않고 직선 선형으로 물길을 유도하여 노천강당 지하 저류조(UST2)에 유입하는 방안을 검토하였다. 이는 기존 댐의 방류구와 연결된 박스 압거를 막아 우수를 공대폭포 유역으로 보내지 않고, 압거를 신설하여 순환도로 건너편에 위치한 버들골의 지하에 15,000 m³ (60 m × 50 m × 5 m) 규모의 저류조 또는 25,000 m³ (100 m × 50 m × 5 m) 규모의 저류조를 설치하여 저류하는 것이다. 저류조의 치수는 버들골의 잔디광장을 최대한 보존하고 노후된 기존 노천강당을 개축하여 건설할 수 있도록 결정하였으며, 시공비를 고려하여 15,000 m³와 25,000 m³ 중 선택하도록 2가지 안으로 구성하였다. 캐드 도면에 실제 측정에 의한 15,000 m³ 지하저류조의 배치도를 Figure 2(b)에 수록하였다. 댐 여수로와 신설압거를 연결하여 여수로를 통해 방류되는 유량 Q_i 가 지하저류조로 유하 (UST2 유입량 Q_{o1} , 유출량 Q_{o2})되는 구조로 설계하였다 (Figure 3). 이를 통해 기존 댐으로 인해 인위적으로 변경되었던 물길을 바로 잡고, 신설 저류조를 통해 캠퍼스 유출량 저감 및 레저용지 확보 효과를 기대할 수 있다.

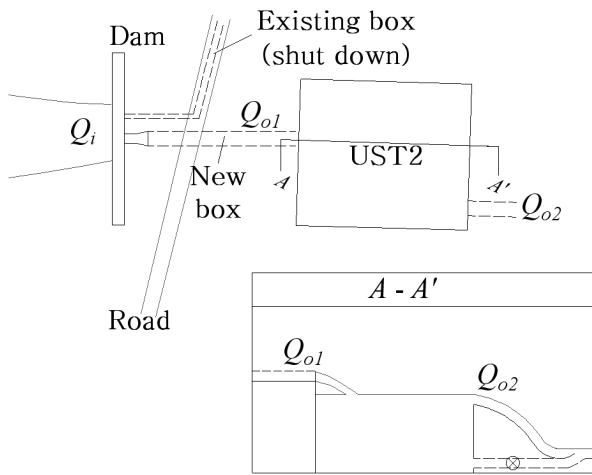


Fig. 3. Schematic diagram of installation of UST2 near Amphitheater

4. 지하저류조 신설에 따른 우수 유출량 저감

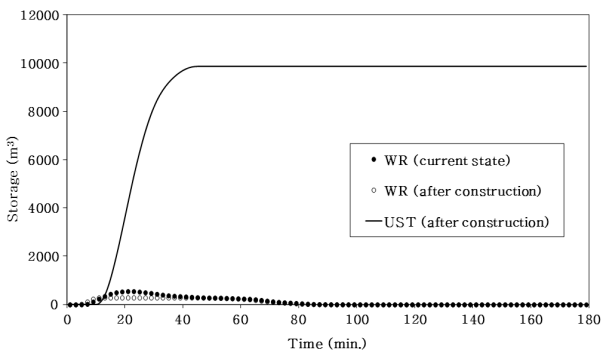
4.1 저류조 신설효과 분석

상술한 공대폭포 유역과 노천강당 유역에 지속시간 1시간 50분 빈도 강우에 관한 저수지 홍수추적을 실시하고 지하저류조가 설치되는 경우 저류조의 저류량, 우수유출량의 저감정도, 침투 수위 감소 및 지체시간 확보 등의 효과를 분석하였다. Figure 4는 공대폭포 유역에 10,500 m³ 규모의 지하저류조가 설치되는 경우 폭포저수

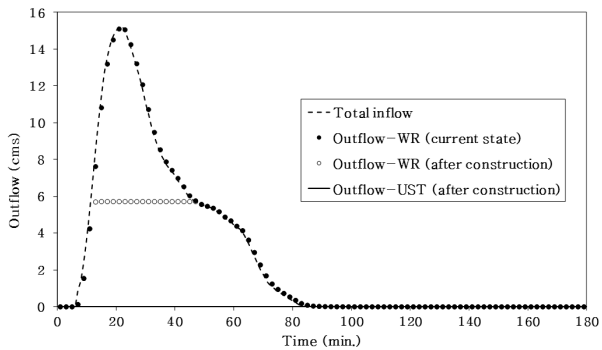
Table 1. Reduction of rainfall runoff by constructing UST1 near Engineering Waterfall

Attribute	After the construction of underground storage tank		
	Current state Waterfall Reservoir	Waterfall Reservoir	Underground Storage Tank
Dimension	levee height 2.5 m	levee height 2.5 m	70 m × 25 m × 6 m
Accumulated inflow	29,457 m ³	29,457 m ³	
Peak inflow	15.2 m ³ /sec	5.72 m ³ /sec	9.48 m ³ /sec
Storage	0 m ³	0 m ³	10,500 m ³
Accumulated outflow	29,457 m ³	18,957 m ³	0 m ³
Peak outflow	15.21 m ³ /sec	5.72 m ³ /sec	0 m ³ /sec
Storage ratio	0 %	40.23 %	
Reduction of peak outflow	0.0 %	62.4 %	
Lag time	0 min.	4 min.	
Peak water surface elevation	1.58 m	0.82 m	5.64 m

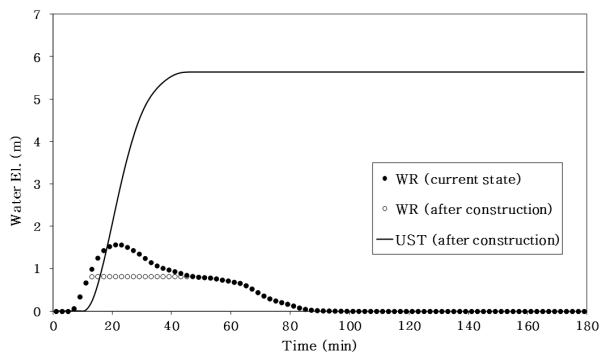
지와 저류조에 의한 저류효과를 현 상태의 폭포저수지의 저류효과와 비교하여 시간에 따른 저류량, 유출량 및 수위 변동 양상을 도시한 것이다. 저류조가 설치되는 경우 폭포저수지의 저류량은 약 10,500 m³ 감소하게 되며 첨두 유출량은 9.48 m³/s, 첨두 수위는 0.76 m 낮아지는 것으로 나타났다. 이는 신설되는 저류조가 지속시간 1시간 50년 빈도 강우에 의한 29,457 m³의 유입 유량 중 저류조의 시설용량에 해당하는 유량을 수용하기 때문이며, 이에 따라 Table 1과 같이 총 유입량 대비 40.23 %의 저류효과가 발생하고 62.4 %의 첨두 유량 감소효과가 발생하였으며, Figure 4(a)의 점과 원으로 표시된 값의 첨두차에 해당하는 4 분의 지체시간을 확보할 수 있는 것으로 나타났다.



(a) Storages



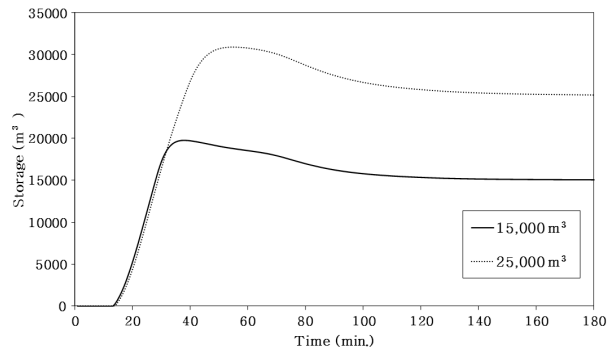
(b) Outflows



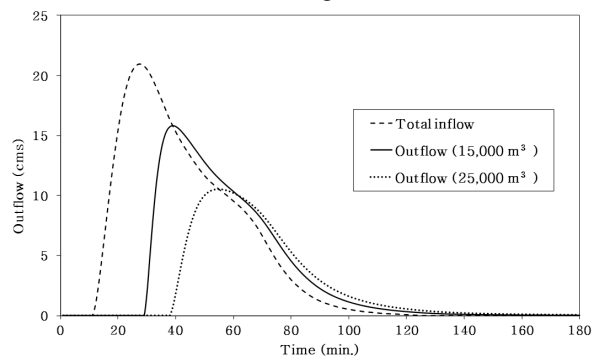
(c) Water levels

Fig. 4. Storage and discharge changes by constructing UST1

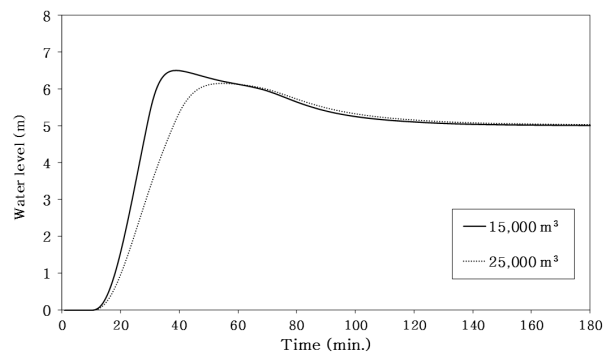
Figure 5는 노천강당 유역에 15,000 m³ 규모 또는 25,000 m³ 규모의 지하저류조가 설치되는 경우 시간에 따른 총 저류량, 유출량 및 수위 변동 양상을 도시한 것이다. 노천강당 유역에 지속시간 1시간 50년 빈도 강우가 발생하는 경우 50,579 m³의 유입량 중 저류조의 시설용량에 해당하는 유량을 수용하여, 실선으로 표시한 15,000 m³ 규모의 저류조에 의한 효과와 점선으로 표시한 25,000 m³ 규모의 저류조에 의한 효과가 확연히 다르게 나타났다. Figure 5(a)에서 15,000 m³ 저류조에 우수가 유입되는 경우 시설용량을 초과하는 30분부터 Figure 5(b)와 같이 유출이 발생하였으며, 시간에 따른 저류조 내의 유량과 유출량을 포함한 총 저류량이 Figure 5(a)의 실선과 같이 나타났다. 또한 유출량이 거의 없는



(a) Storages



(b) Outflows



(c) Water levels

Fig. 5. Storage and discharge changes by constructing UST2

100분 이후부터는 시설용량인 15,000 m³에 접근하였다. 25,000 m³ 저류조의 경우도 시설용량을 초과하는 38분부터 Figure 5(b)와 같이 유출이 발생하였으며, 유출량이 반영된 총 저류량이 Figure 5(a)의 점선과 같이 변화였다. 이에 따라 Table 2와 같이 15,000 m³ 저류조가 설치되는 경우 총 유입량 대비 29.66 %의 저류효과가 발생하고 24.49 %의 침투 유량 감소효과와 12분의 지체시간 증대 효과를 확보할 수 있었다. 또한 25,000 m³ 저류조가 설치되는 경우 총 유입량 대비 49.43 %의 저류효과가 발생하고 49.64 %의 침투 유량 감소효과와 28 분의 지체시간을 확보할 수 있었으며, 침투 수위는 15,000 m³ 저류조에 비해 35 cm 낮게 나타났다.

이와 같이 기존 폭포저수지와 신설 지하저류조의 연계 운영을 통해 저류가능 규모를 여유 있게 확보하면, 홍수 발생 시 댐 유역에서 초과되는 유출량을 탄력적으로 관리할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 노천강당 유역에 신설된 지하저류조는 인문대 지역에 설치되어 있는 기존의 박스 암거와의 연결을 통해 통수가 가능하여, 관악산 계곡부터 도림천까지 자연스럽게 통수되는 옛 물길 복원 효과도 가져다 줄 것으로 기대된다.

4.2 지하저류조 유출입부 암거 설계

관악산 유역으로부터 캠퍼스로 유입되는 우수 중 댐 유역으로부터

Table 2. Reduction of rainfall runoff by constructing UST2 near Amphitheater

Attribute	Storage tank - 15,000 m ³	Storage tank - 25,000 m ³
Dimension	60 m × 50 m × 5 m	100 m × 50 m × 5 m
Accumulated inflow	50,579 m ³	50,579 m ³
Peak inflow	20.95 m ³ /sec	20.95 m ³ /sec
Storage	15,000 m ³	25,000 m ³
Accumulated outflow	35,579 m ³	25,579 m ³
Storage ratio	29.66 %	49.43 %
Peak outflow	15.82 m ³ /sec	10.55 m ³ /sec
Reduction of peak outflow	24.49 %	49.64 %
Lag time	12 min.	28 min.
Peak water surface elevation	6.51 m	6.16 m

Table 3. Design of new box at inlet part of Engineering Waterfall

Attribute	Classification	Value	Calculated by
Box dimension & hydraulic factors	Width (<i>B</i>)	3.0 m	$A = BH$
	Height (<i>H</i>)	1.5 m	
	Area (<i>A</i>)	4.5 m ²	
	Wetted perimeter (<i>P</i>)	9.0 m	$P = 2(b+h)$
	Hydraulic radius (<i>R_h</i>)	0.5 m	$R_h = A/P$
	Length (<i>l</i>)	72 m	
	Elevation change (Δh)	0.32 m	
	Bottom slope (<i>S_f</i>)	0.004	$S_f = \Delta h/l$
Flow factors	Roughness coeff. (<i>n</i>)	0.014	
	Velocity (<i>V</i>)	2.85 m/s	Manning eq.
	Discharge (<i>Q</i>)	12.81 m ³ /s	$Q = AV$
	Design discharge (<i>Q_d</i>)	10.25 m ³ /s	$Q_d = 0.8Q$
Check	Peak discharge (<i>Q_p</i>)	9.48 m ³ /s	
	Slope (<i>S_f</i>) criteria	O.K.	$S_f > 0.002$
	Velocity (<i>V</i>) criteria	O.K.	$V < 3.0 \text{ m/s}$
	Discharge (<i>Q_d</i>) criteria	O.K.	$Q_d > Q_p$

터 유입되는 우수량이 가장 많으므로 이 지역의 배수 구조를 잘 설계하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 절에서는 신설 지하저류조의 유출입부 암거를 설계하였다. Table 3은 공대폭포 지하저류조로 우수를 유입하기 위해 설치되는 신설암거의 제원 및 특성, 통수되는 우수의 평균유속 및 유량을 나타낸 것이다. Figure 6과 같이 기존 암거(3.0×2.0)의 바닥을 기준으로 0.5 m까지는 공대폭포 저수지로, 이후 높이로 유입되는 우수는 지하저류조로 분산시키는 구조이므로 신설암거의 폭과 높이는 국내 표준암거 사양서(KPCC, 2009)를 바탕으로 3.0 m와 1.5 m로 설계하였다. 수치지형도를 바탕으로 암거의 길이를 72 m, 경사는 0.004로 설계하는 경우 앞서 상술한 Manning 공식에 의해 평균유속은 2.85 m/s로 계산되었다. 조도계수는 Chow(1959)가 제시한 굴곡부와 연결부가 있고 토사 및 불순

물이 포함된 콘크리트 암거의 값인 0.014를 이용하였다. 설계 통수량은 최대 통수량의 80%가 되도록 권장하고 있으므로 (Korea Expressway Corporation, 2001) 설계유량 Q_d 는 $10.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 산출되어 저류지 홍수추적에 의해 계산된 침투 유량인 $9.48 \text{ m}^3/\text{s}$ 를 방류할 수 있는 것으로 나타났다. 지하저류조로 유입된 우수는 Figure 4(b)와 같이 홍수시점으로부터 80분 이후부터 유출되는 유량이 없다. 따라서 별도의 수리계산 없이 지하저류조 유출부의 암거는 공대폭포 하류부의 기존암거의 규격을 바탕으로 2.9×2.6 의 단면으로 길이 14 m로 신설하여 Figure 6과 같이 기존 암거에 연결하는 방식을 취했다. 노천강당 지역의 $15,000 \text{ m}^3$ 및 $25,000 \text{ m}^3$ 지하저류조의 유출입 암거도 위와 같은 방법으로 설계하여 Figure 7에 수록하였다.

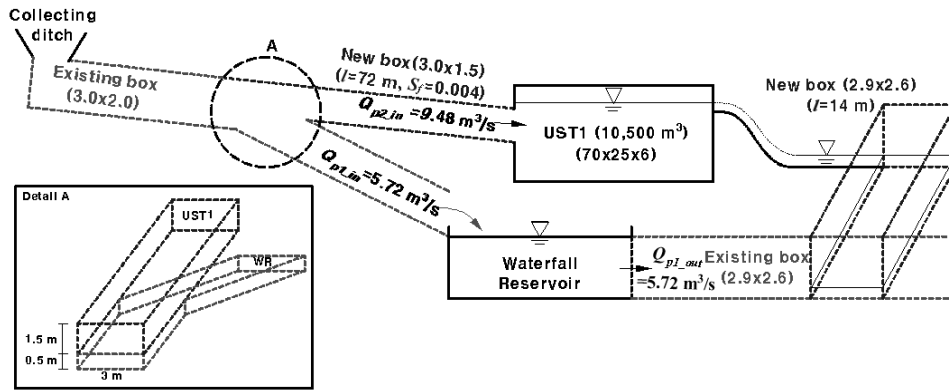


Fig. 6. Schematic diagrams of installation of new boxes near Engineering Waterfall

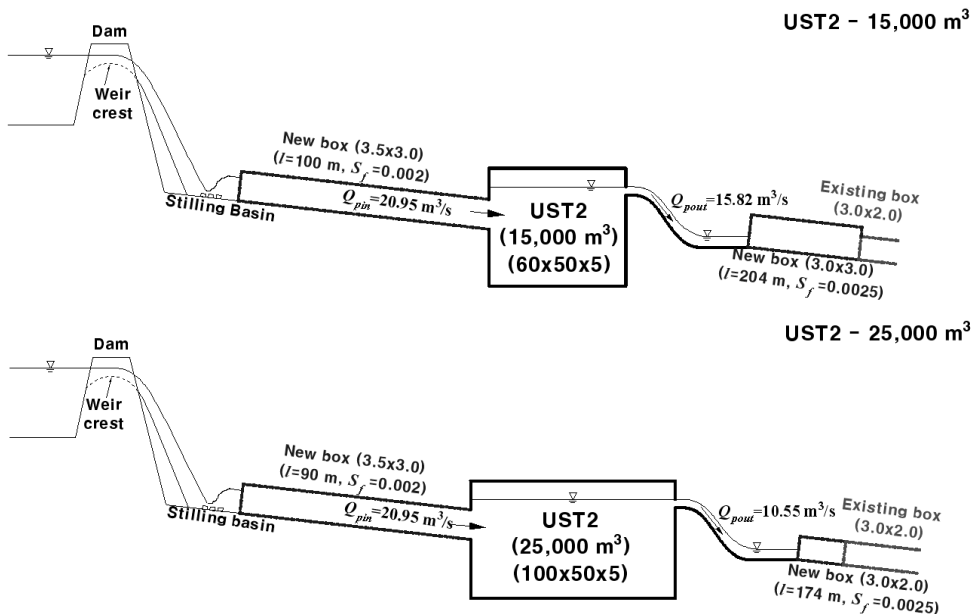


Fig. 7. Schematic diagrams of installation of new boxes near Amphitheater

5. 결론

우수저류시설 중 도시구역의 우수배제를 위해 사용되는 저류조는 강우 시 순간 유출량을 감소시켜 홍수기 유출에 의한 저지대 침수를 방지하는 효과가 있다. 본 연구에서는 서울대학교 댐 하류 공대폭포 유역과 노천강당 유역에 지속시간 1시간 50년 빈도 강우에 관한 저수지 홍수추적을 실시하고 치수 목적으로 지하저류조가 설치되는 경우 저류조의 저류량, 우수유출량의 저감정도, 침두 수위 감소 및 지체시간 확보 등의 효과를 분석하고, 신설 지하저류조의 유출입부 암거를 설계하였다.

공대폭포 유역에 10,500 m³ 규모의 지하저류조가 설치되는 경우 폭포저수지와 저류조에 의한 저류효과를 현 상태의 폭포저수지만의 저류효과와 비교하여 시간에 따른 저류량, 유출량 및 수위 변동 양상을 분석하였다. 저류조가 설치되는 경우 폭포저수지의 저류량은 약 10,500 m³ 감소하게 되며 침두 유출량은 9.48 m³/s, 침두 수위는 0.76 m 낮아지는 것으로 나타났다. 또한 노천강당 유역에 25,000 m³ 저류조가 설치되는 경우 총 유입량 대비 49.43%의 저류효과가 발생하고 49.64%의 침두 유량 감소효과와 28분의 지체시간을 확보할 수 있었으며, 침두 수위는 15,000 m³ 저류조에 비해 35 cm 낮게 나타났다. 따라서 기존 저류시설과 신설 지하저류조의 공동 운영을 통해, 홍수 발생 시 댐 유역에서 초과되는 유출량을 탄력적으로 관리할 수 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서는 가용할 수 있는 자료가 부족하고 모형을 적용하기 힘든 경우 기존의 저수지 추적 이론에 바탕을 둔 해석을 통해 저류조 건설효과를 분석할 수 있는 비교적 간편하면서 단기간에 결과를 도출할 수 있는 방법을 제시하였다. 향후 실시 설계 단계에서는 지하저류조 유입부에서의 접근 수심과 접근 유속에 따른 정밀한 수리 해석, 우수의 강하에 대한 지하저류조의 구조적인 해석, 저류조 유출부 형태에 따른 유출량 해석, 유출입부 관로 및 저류시설 설치 전 후의 관망 해석, 유입량에 따른 암거 내부 및 접합부에서의 흐름 해석 등을 추가적으로 검토해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업(11기술혁신C06)의 지원에 의해 수행되었습니다. 본 연구는 서울대학교 공학연구소 및 건설환경종합연구소의 지원으로 수행되었습니다. 연구비를 지원해 준 서울대학교 기획과 및 시설과와 수문자료를 생성해준 서울대학교 수문학연구실에 감사를 표합니다.

References

- Chow, V. T. (1959). *Open channel hydraulics*, McGraw-Hill.
- Eagleson, P. S. (1970). *Dynamic hydrology*, McGraw-Hill.
- Federal Highway Administration (1985). *Hydraulic design of highway culvert*.
- Green Growth Korea, and Korea Meteorological Administration (2011). *A report on the 2011 anomaly climate*, Report 11-1360000-000705-01, p. 45 (in Korean).
- Kim, Y. J., Han, K. Y., and Cho, W. H. (2010). "Analysis on the effects of flood damage mitigation according to installation of underground storage facility." *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 30, No. 1B, pp. 41-51 (in Korean).
- Korea Expressway Corporation (2001). *Design of road (II) earth-work and drainage* (in Korean).
- KPCC (2009). *Precast reinforced concrete box culverts* (in Korean).
- Lee, D. J., Yoon, H. S., Sun, S. W., Kwak, S. D., and Lee, D. H. (2004). "Optimal sizing of CSOs storage tank by stormwater simulation modeling(II) - Design of storage tank for first flush." *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, Vol. 26, No. 3, pp. 370-380 (in Korean).
- Lee, D. K. (2005). *Development and application of rainwater collection model by the ground*, Master Thesis, Chungnam National University (in Korean).
- Lee, J. H. (2006). *A study on the estimation of flood discharge as a result of rainwater storage tank based on Cheonggye-Stream*, Master Thesis, University of Seoul (in Korean).
- Lee, J. J., and Kim, H. N. (2008). "Analysis of rainfall runoff reduction effect depending upon the location of detention pond in urban area." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 28, No. 5B, pp. 535-546 (in Korean).
- Lee, J. J., and Kwak, C. J. (2008). "A development of simplified design method of the detention pond for the reduction of runoff." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 7, pp. 693-700 (in Korean).
- Lee, S. H. (2011). *Development of commercial program for design of hydraulics in culvert*, National Emergency Management Agency (in Korean).
- Ryu, S. H., and Lee, J. H. (2012). "Determination of optimal locations and size of storage in the urban sub-surface using genetic algorithm." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 12, No. 3, pp. 285-290 (in Korean).
- Seo, I. W., Kim, Y. O., and Chung, C. K. (2012). *A study on the mitigation of flood damage by climate change in Gwanak campus, Seoul National University*, Integrated Research Institute of Construction and Environment, Seoul National University (in Korean).
- Wanielista, M. P., and Yousef, Y. A. (1992). *Stormwater management*, Wiley-Interscience.
- Yoon, Y. J., and Lee, J. C. (2001). "Estimation of the stormwater impoundments volume dependent on the duration of design rainfall." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 34, No. 5, pp. 415-426 (in Korean).