

유입량 변화에 따른 도심지 내 우수저류조 관망시스템의 안정성 검토

유형주¹ · 김동현² · 맹승진³ · 이승오^{4*}

¹홍익대학교 토목공학과 박사과정, ²홍익대학교 토목공학과 박사과정, ³충북대학교 지역건설공학과 교수, ⁴홍익대학교 토목공학과 교수

Hydraulic Stability Examination of Rainwater Reservoir Pipe Network System on Various Inflow Conditions

Hyung Ju Yoo¹, Dong Hyun Kim², Seung Jin Maeng³, and Seung Oh Lee^{4*}

¹Ph. D Student, Department of Civil Engineering, Hongik University

²Ph. D Student, Department of Civil Engineering, Hongik University

³Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk University

⁴Professor, Department of Civil Engineering, Hongik University

요약

최근 기후변화로 인해 강우강도 및 빈도의 증가에 따른 국지성 집중호우의 피해가 증가함에 따라 초기 우수에 대응할 수 있는 시설물 설치가 필요한 실정이다. 이를 위해, 빗물을 직접 유출하지 않고 저류 시키는 저영향 개발(Low Impact Development)기법을 적용한 시설물 설계 및 수치모형을 이용한 유출저감효과 검토에 관한 연구가 많이 진행되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 유출저감효과에 대한 검토만 수행된 반면, 시설물에 유입되는 유량에 의한 흐름특성 변화 검토 및 안정성 검토에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 LID 기법이 많이 적용되고 있는 회전교차로를 대상으로 하여, 회전교차로 내의 우수저류조의 관망시스템의 안정성 검토를 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 사용하여 검토하였다. 또한 우수저류조의 최적의 설계방안 도출을 위하여 우수저류조의 수를 증가하여 용량증가에 따른 유속과 동압의 변화를 검토하고 설계기준과 비교하였다. 우수저류조의 제원 및 유입유량은 선행연구에서 제시된 값을 적용하여 수치모의를 수행한 결과, 유속은 저류조 설치개소 수가 증가할수록 빨라지는 것을 확인하였고, 대부분 설계기준 범위 안에 유속이 형성되는 것을 확인하였다. 다만 추가 저류조가 3개 이상일 경우는 추가저류조관에서 유속이 3.44 m/s가 발생하여 설계유속의 허용범위를 초과하였고, 유속의 증가율도 일정해지는 것으로 나타났다. 난류강도 및 바닥전단력 비교의 경우, 저류조 설치개소수가 증가함에 따라 바닥전단력이 한계소류력보다 크게 나타나 유입토사의 침전은 발생하지 않을 것으로 예상되나 난류강도의 크기가 작아져 플록(Floc)형성으로 인한 토사 침전이 발생할 수 있음을 고려해야 한다. 최종적으로 유속을 이용한 동압 산정 결과를 우수관 설계에 일반적으로 사용되는 압력관의 허용내압과 비교하였을 경우, 동압이 허용내압보다 작게 나타났다. 이를 통하여 본 연구에서 제안한 우수저류조 제원으로 설계할 경우 추가 저류조를 2개까지 설치하는 것이 가장 적합한 것으로 나타났다. 이는 저류조를 계속하여 설치하게 되면 배수가 원활해져 관내 유속이 빨라지고, 유속증가로 인하여 관의 마모손상 등의 문제가 일어날 수 있기 때문이다. 그러나 본 연구는 저류조의 제원 및 우수의 유입량을 가정하였고, 단순히 저류조를 추가하여 저류조 설계방안을 도출한 한계점이 있어 향후에는 다양한 저류조 형태 및 우수유입 시나리오를 적용하여 검토한다면 보다 효율적인 설계방안 도출이 가능할 것으로 기대된다.

핵심용어: 저영향개발, 우수저류조, FLOW-3D, 수치모의, 동압

ABSTRACT

Recently, as the occurrence frequency of sudden floods due to climate change increased, it is necessary to install the facilities that can cope with the initial stormwater. Most researches have been conducted on the design of facilities applying the Low Impact Development (LID)

*Corresponding author: Seung Oh Lee, seungoh.lee@hongik.ac.kr

Received: 10 November 2019, Revised: 5 December 2019, Accepted: 12 December 2019



and the reduction effect on rainfall runoff to examine with 1D or 2D numerical models. However, the studies on the examination about flow characteristics and stability of pipe network systems were relatively insufficient in the literature. In this study, the stability of the pipe network system in rainwater storage tank was examined by using 3D numerical model, FLOW-3D. The changes of velocity and dynamic pressure were examined according to the number of rainwater storage tank and compared with the design criteria to derive the optimal design plan for a rainwater storage tank. As a results of numerical simulation with the design values in the previous study, it was confirmed that the velocity became increased as the number of rainwater storage tank increased. And magnitude of the velocity in pipes was formed within the design criteria. However, the velocity in the additional rainwater storage pipe was about 3.44 m/s exceeding the allowable range of the design criteria, when three or more additional rainwater storage tanks were installed. In the case of turbulence intensity and bottom shear stress, the bottom shear stress was larger than the critical shear stress as the additional rainwater storage was increased. So, the deposition of sediment was unlikely to occur, but it should be considered that the floc was formed by the reduction of the turbulence intensity. In addition, the dynamic pressure was also satisfied with the design criteria when the results were compared with the allowable internal pressure of the pipes generally used in the design of rainwater storage tank. Based on these results, it was suitable to install up to two additional rainwater storage tanks because the drainage becomes well when increasing of the number of storage tank and the velocity in the pipe becomes faster to be vulnerable to damage the pipe. However, this study has a assumption about the specifications of the rainwater storage tanks and the inflow of stormwater and has a limitation such that deriving the suitable rainwater storage tank design by simply adding the storage tank. Therefore, the various storage tank types and stormwater inflow scenarios will be asked to derive more efficient design plans in the future.

Keywords: Low impact development, Rainwater storage tank, FLOW-3D , Numerical simulation, Dynamic pressure

1. 서론

빗물을 직접 유출하지 않고 땅으로 침투·여과·저류 시키는 저영향 개발(Low Impact Development, 이하 LID)기법은 우수유출 저감을 통하여 도심지 물 순환시스템 회복, 빗물의 재이용, 재난관리 등의 목적을 달성할 수 있어 최근 스마트도시 구축 시 많이 적용되고 있다(Ministry of Environment, 2014; Kim et al., 2017). 또한 최근 기후변화로 인해 강우강도 및 빈도의 증가에 따른 국지성 집중호우의 피해가 증가함에 따라 초기 우수 대응을 위하여 우수 저류시설 및 차집시설의 설치가 고려되고 있다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport. 2016). 그러나 최근 LID 기법을 활용하여 물 순환 도시 조성 등을 위한 연구는 LID 기법에 관한 문헌 조사, 시범시설 운영 등을 통한 정책방안 및 도입방안을 제시할 뿐 LID기법을 적용한 시설의 설계방안 제시는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 최근 LID기법이 많이 적용되고 있는 회전교차로를 대상으로 하여 회전교차로 내의 우수 저류조 설계방안을 검토하고자 한다.

기존에 우수 저류조 설계에 관한 연구는 수치모형, 현장모의 실험 및 실증시설 구축을 통한 모니터링 등을 통하여 주로 수행되어왔다. 국내의 경우, Yoon et al.(2017)은 LID 기법을 적용하여 다양한 실증시설을 구축하였고, 각 실증시설에 대한 모니터링을 통하여 저류효과를 검토하였으며, Kim et al.(2017)은 SWMM 모형을 이용하여 LID기법을 적용한 저류조의 우수 유출 저감량을 검토하였고, Lee(2019)는 현장모의 실험결과 및 SWMM 모형을 이용하여 다양한 유량 및 경사에 따라 유속의 변화를 검토하였다. 국외의 경우, Jia et al.(2012)는 LID 기법 적용 시 도시 유출저감 효과 검토 및 최적유지관리 방안(BMPs) 도출을 위하여 SWMM모형을 적용하였고, Wang et al.(2012)는 SWMM의 LID 모듈을 이용하여, LID 기법을 적용한 저류조 시스템 구축 시 유출량의 저감 효과를 검토하였다. Liao et al.(2015)는 중국 상하이에 SWMM 모형을 이용하여 저영향 개발 기법을 저류조 및 관망설계에 적용하였고, 월류 방지 효과에 대하여 검토한바 있다. 또한 Guo and Adams(1998)은 LID 기법을 적용한 우수 저류조에 대하여 최적의 관리방안을 도출하기 위하여 다양한 홍수사상을 적용하여 우수 저류조 설치에 따른 유출량의 저감을 검토하였고, Luan et al.(2017)은 도심지내 초기 우수대응을 위하여 LID 기법을 적용한 우수 저류조 설계안을 적용하였고, SWMM 모형을 사용하여 빈도별 홍수에 따른 저류조의 유출저감 효과를 검토한 결과, 우수저류조가 2년 빈도 홍수까지만 저류효과가 있음을 확인하였다. 그러나 대부분의 우수 저류조에 대한 연구는 저류조 설계를 통한 우수유출 저감 효과에 대한 검토 및 검토결과를 통한 저류조의 효율적인 관리방안 도출제시만 있을 뿐 저류조 설계 시 설

계 홍수량에 따른 관내 흐름특성 및 관의 안전성 검토에 관한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 우수 저류조 내 저류관망시스템의 흐름특성 및 안전성 분석을 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 검토하였다. 또한 다양한 저류조 용량을 고려하여 저류조 용량에 따른 저류관망시스템의 흐름특성 및 안전도 분석결과를 우수관거 유속설계 기준 및 동압 기준과 비교하여 안전성 측면에서 최적의 우수 저류조 용량을 도출하고자 한다.

2. 본론

2.1 이론적 배경

2.1.1 3차원 수치모형의 기본이론

FLOW-3D는 미국 Flow Science, Inc에서 개발한 범용 유체역학 프로그램(CFD, Computation Fluid Dynamics)으로 자유수면을 갖는 흐름모의에 사용되는 3차원 수치해석 모형이다. 난류모형을 통해 난류 해석이 가능하고, 관수로의 흐름 해석에도 많이 사용되어 왔다(Flow Science, 2011). 본 연구에서는 LID기법을 적용하여 회전교차로 지하공간을 활용한 우수저류시설의 대표 단면에서 유입유량에 따른 관거 내 흐름해석을 실시하였다.

2.1.2 유동해석의 지배방정식

1) 연속 방정식(Continuity Equation)

FLOW-3D는 비압축성 유체에 대하여 연속방정식을 사용하며, 밀도는 상수항으로 적용된다.

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(uA_x) + \frac{\partial}{\partial y}(vA_y) + \frac{\partial}{\partial z}(wA_z) = \frac{RSOR}{\rho} \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체 밀도(kg/m^3), u, v, w 는 x, y, z 방향의 유속(m/s), A_x, A_y, A_z 는 각 방향의 요소면적(m^2), $RSOR$ 는 질량 생성/소멸(mass source/sink)항을 의미한다.

2) 운동량 방정식(Momentum Equation)

각 방향 속도성분 u, v, w 에 대한 운동방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 다음 Eqs. (3), (4), (5)와 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - b_x - \frac{RSOR}{\rho V_F} u \quad (3)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - b_y - \frac{RSOR}{\rho V_F} v \quad (4)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F}(uA_x \frac{\partial u}{\partial x} + vA_y \frac{\partial v}{\partial y} + wA_z \frac{\partial w}{\partial z}) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - b_z - \frac{RSOR}{\rho V_F} w \quad (5)$$

여기서, G_x, G_y, G_z 는 체적력에 의한 가속항, f_x, f_y, f_z 는 점성에 의한 가속항, b_x, b_y, b_z 는 다공성 매체에서의 흐름손실의 미한다.

2.1.3 동압 산정

우수저류시설 설계 시 우수관거의 안정성 확보를 위해서는 우수관거 내 흐름에 의하여 관로에 작용하는 동압을 견딜 수 있는 재질 선택이 필요하다. 국내의 경우 동압에 대한 정확한 기준은 제시되어 있지 않지만 관로시설 설계기준(ME, 2017)에서는 관에 안전성 확보를 위해서는 내압을 충분히 견딜 수 있는 재질을 사용하여야 한다고 제시하고 있다. 여기서, 관로에 작용하는 내압은 관로의 흐름 및 유량을 이용하여 동압을 산정하여 검토할 수 있으며, 동압 산정식은 다음과 같다(Fig. 1 참조).

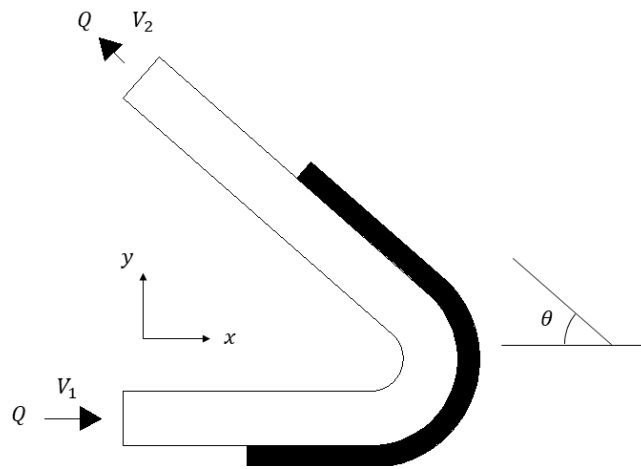


Fig. 1. Conceptual diagram for dynamic pressure

$$x\text{방향: } F_x = \left(\frac{1}{C_c^2} + 1 + K_e \right) \frac{\rho_w V_1^2}{2} A \tag{6}$$

$$y\text{방향: } F_y = \rho_w A V_2^2 \tag{7}$$

$$\text{동압에 의한 반력: } F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \tag{8}$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도(kg/m^3), $C_c(=V_1/V_2)$ 는 수축계수, K_e 는 관이 접하면서 생기는 손실계수($=0.9$), A 는 관의 단면적 (m^2), V_1 and V_2 는 각각 단면 1, 2에 대한 단면 평균 유속(m/s)을 의미한다.

FLOW-3D를 이용한 수치모의 수행을 통하여 각 관의 단면 평균 유속을 도출할 수 있으며, 본 연구에서는 동압을 산정하기 위해서 시간별 관내의 단면 평균유속의 변화를 검토하여 최대 유속 값을 이용하였다. 최종적으로 산정한 동압과 관의 재질 및 종류에 따른 허용내압범위와 비교하여 우수관거의 안정성 검토를 수행하였다.

2.2 우수관거 유속 설계 기준

우수 저류조 설계 시 유입되는 유량(갈수량 또는 홍수량)에 따라 설계유속을 만족해야한다. 국내의 경우 우수 관거에 대한 유속의 설계 기준은 하수도시설기준(ME, 2015)에서 최소 0.8 m/s에서 최대 3.0 m/s로 제시하고 있다. 관내 최소 유속의 제

한 기준을 두는 이유는 하수 중의 오물이 차례로 관거에 침전되는 것을 방지하기 위함이며, 최대 유속의 제한 기준은 유출량과 유입되는 유사가 관에 마모 손상을 일으킬 가능성이 있어 이를 방지하기 위해 관거의 안전성 측면에서 고려하였다. 국외의 우수관거에 대한 유속 기준은 지역별로 상이하며, 대체로 최대 3.0 ~ 4.5 m/s의 범위인 것으로 조사되었다. 미국의 Michigan 주와 일본은 우리나라와 동일한 최대유속 3.0 m/s 기준을 가졌으며, 그 외의 국가에서는 우수관거 유속설계 기준이 3.0 m/s보다 상회하거나 설계기준 자체가 존재하지 않았다. 특히, 호주의 경우 추가적으로 흐름의 운동에너지를 소산시키기 위해 낙차구조물을 설치해야 하며, 관경에 제한이 있기 때문에 관내설계기준이 3.0 m/s 보다 빠르고, 미국 Iowa 주의 경우, 관의 재질에 대한 제한이 있기 때문에 관내설계기준이 3.0 m/s보다 빠르다. 관련된 국내·외의 하수관 내 유속기준은 Table 1에 정리하여 제시하였다.

Table 1. Maximum velocity standard for stormwater pipelines from Korea and foreign countries (Korea Land & Housing Corporation, 2010)

| Country (Reference) | Maximum Velocity | Remarks |
|---------------------|--|---|
| Japan | Sewage Facility Planning·Design Guidelines and Commentary (2001) | 3.0 m/s |
| | Wastewater Engineering: Collection and pumping of wastewater | None |
| U.S.A | Iowa State | 4.5 m/s |
| | Michigan State | 3.0 m/s |
| Australia | Queensland Urban Drainage Manual (2007) | Partial flow: 7.0 m/s Full flow: 6.0 m/s |
| Europe (UK) | BS EN 752-4 | None |
| Korea | Pipeline Design Standards (2017) | 3.0 m/s |

2.3 저류조 추가에 따른 저류관망시스템 영향 분석

2.3.1 모형의 구축 및 경계조건

본 연구에서는 회전교차로 지하공간을 활용 가능한 우수저류시설의 우수관거에 유입유량에 따른 유속 및 수충력 분포 특성을 알아보기 위해 FLOW-3D 수치모형을 이용하였다. 우수 저류조는 선행연구(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016)에서 제시한 제원을 이용하여 구축하였으며, 가로 2.16 m, 세로 3.6 m, 높이 2.34 m로 저류조 용량은 15 ton_t(18.2 m³)이고, 관거의 직경은 0.25 m이다. 우수관거 내의 유속분포 특성을 예측하기 위하여 격자간격을 0.1 m의 크기로 하여 총 격자수는 1,336,440개로 구성하였으며, 저류관망시스템의 흐름해석을 위한 경계조건으로 Z축의 상부는 유입유량(inflow), 바닥은 벽면(wall), X축과 Y축도 벽면으로 적용하도록 하였다(Table 2, Fig. 2 참조). 난류모형은 Renormalized Group(RNG)모형을 사용하였고, 저류관망시스템 내의 유속분포 및 수충력을 통한 관로의 안전성을 검토하기 위하여 수치모의는 Table 3에 제시된 것과 같이 선행연구에서 제안된 우수 저류조를 반영하였고, 우수저류조 개소수를 증가시켜 수행하였다. 선행연구에서 제시한 회전교차로의 면적을 유역면적으로 가정하고, 강우강도식 및 유출계수를 이용하였다. 또한 우수 유입유량은 강우강도식을 구할 수 있는 경우 하수도 설계 기준(ME, 2017)에 따라 합리식(Rational Method)을 적용하여 산정하기 때문에 이를 이용하였다. 또한 산정한 우수유입량은 우수저류조로 균등하게 유입된다고 가정하였다. 각각의 인자 값 및 산정한 우수유입량은 Table 4에 제시하였다. 시간에 따라 동일한 유량이 일정하게 유입되도록 모의를 수행하였으며, 시간간격(Time Step)은 0.01 sec로 설정(0.3 < CFL < 0.5) 하였다. 또한 관거 내 유량의 변동 값이 1.0% 이내일 경우는 연속방정식을 만족하고 있다고 가정하였다. 이는, 유량의 변동 값이 1.0% 이내일 경우 유속의 변동 값 역시 1.0% 이내이며, 수치모의 결과 1.0%의 유속변동은 관내 유속설계기준에 크게 영향을 미치지 않는다고 판단하였다. 그 결과 모든 수치모의 Case에서 300초 이내에 결과 값이 수렴하는 것을 확인하였다.

Table 2. Mesh sizes and numerical conditions

| | | | | |
|---------------------|--|------|--------------|------|
| | Numbers | | 1,336,440 EA | |
| | Increment ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) | | 0.1 m | |
| Mesh | Range (m) | Axis | Min. | Max. |
| | | x | 0 | 148 |
| | | y | 0 | 129 |
| | | z | 0 | 70 |
| Boundary Conditions | Z_{up} | | Inflow | |
| | X_{up} X_{down} Y_{up} Y_{down} Z_{down} | Wall | | |
| Turbulence Model | RNG model | | | |

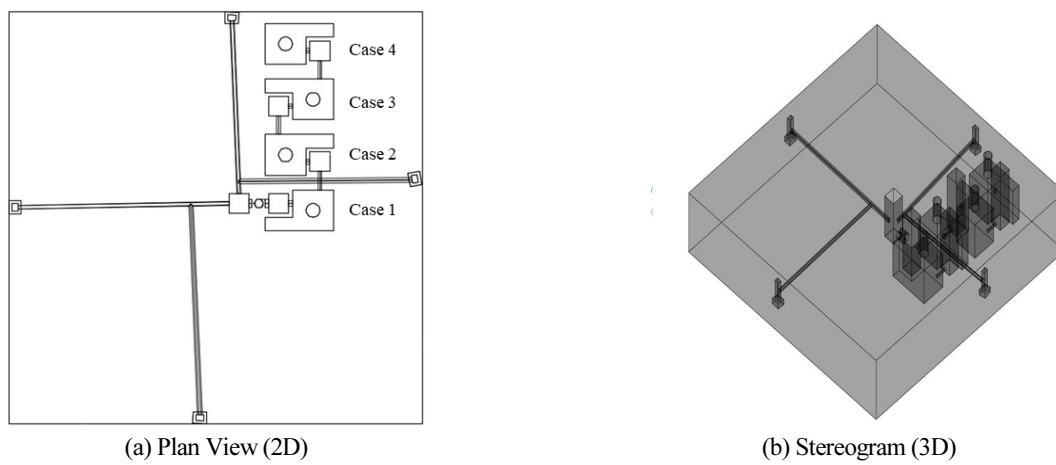


Fig. 2. Layout of rainwater storage tank in this study

Table 3. Case of numerical simulation

| Case | Number of Rainwater Storage Tank |
|------|----------------------------------|
| 1 | 1 |
| 2 | 2 |
| 3 | 3 |
| 4 | 4 |

Table 4. Parameters of inflow using the Rational method

| Parameters | Content |
|--|-----------------------|
| Discharge Coefficient (C) | 0.78 |
| Design Frequency | 10 year |
| Intensity (I , mm/hr) | 160.95 |
| Area of Basin (A , km ²) | 7.14×10^{-3} |
| Total Inflow (m ³ /s) | 0.249 |
| Inflow into Each Inlet (m ³ /s) | 0.06225 |

2.3.2 관로 내 유속 분석

본 연구에서는 우수관거의 합류부 전, 후와 저류조 관의 시간에 따른 유속분포를 검토하기 위해 수치모의 Case 별 Fig. 3과 같이 유속 측정 지점을 설정하였다. Case 1은 총 6개소의 측정지점에 대하여 검토하였으며, Case 2는 총 7개소, Case 3과 Case 4는 Case 2와 동일한 위치 및 추가로 저류조 관을 검토하여 각각 총 8개소, 9개소의 유속을 검토하였다. 측정지점에서의 유량값과 유효면적을 통하여 단면평균유속 결과를 산출하였으며, 수치모의 Case에 대하여 측정지점별 시간에 따른 최소, 최대, 평균유속은 Table 5에 제시하였다.

우수관거의 유속은 합류점(Case 1: OBS3 & OBS6) 및 추가 저류조 관(Case 2 - Case 4: OBS 7)에서 최대유속이 발생하였으며, 우수관거 유속설계기준과 평균유속을 비교하였을 경우, 모든 관에서 최소유속(0.8 m/s) 이상 발생하는 것을 확인하였고, 추가 저류조가 3개 이상일 경우에는 최대 유속조건(3.0 m/s) 이상의 유속이 발생하는 것을 확인하였다. 이는 저류조 추가로 인하여 배수가 원활해짐에 따라 유속이 증가한다고 판단되며, 저류조 용량의 지속적인 증가는 관의 마모 손상을 일으킬 수 있기 때문에 적절한 저류조 용량의 증가를 도출하는 것이 중요하다고 판단되어 진다.

또한 우수 저류조 용량에 따라 유속의 증가율을 검토하였다(Fig. 4 참조). Case 1의 유속(V_0) 및 저류조 용량(TV_0)을 기

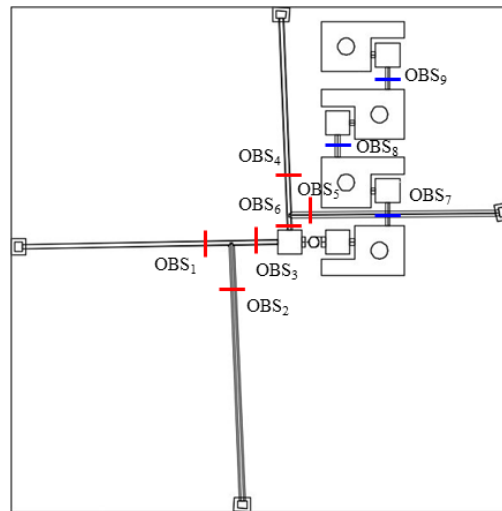


Fig. 3. Observation locations in rainwater storage tank

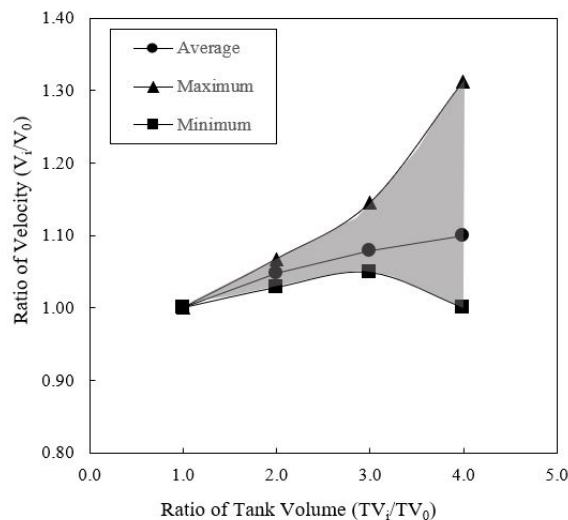


Fig. 4. Variation of velocity ratio according to tank volume ratio

준으로 유속검토 지점별 저류조가 추가됨에 따라 유속은 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 추가 저류조가 2개 이상이 될 때부터 평균유속의 증가율은 일정해지는 것을 확인하였다. 하지만 추가 저류조관의 유속은 저류조 용량이 증가할수록 계속하여 증가하는 것을 확인하였다. 이를 통하여 추가 저류조를 설치할 경우 저류조관의 유속의 증가를 완화시키기 위하여 관의 직경을 증가시키거나 또는 단면형상을 변화시킬 필요가 있다고 판단된다.

Table 5. Numerical results at observation points

| Observation | Case | Minimum velocity (m/s) | Maximum velocity (m/s) | Average velocity (m/s) | Standard of design velocity |
|-------------|------|------------------------|------------------------|------------------------|-----------------------------|
| OBS1 | 1 | 1.24 | 1.41 | 1.31 | O.K |
| | 2 | 1.34 | 1.42 | 1.38 | O.K |
| | 3 | 1.36 | 1.54 | 1.42 | O.K |
| | 4 | 1.38 | 1.55 | 1.44 | O.K |
| OBS2 | 1 | 1.20 | 1.34 | 1.26 | O.K |
| | 2 | 1.24 | 1.34 | 1.31 | O.K |
| | 3 | 1.29 | 1.34 | 1.33 | O.K |
| | 4 | 1.29 | 1.35 | 1.34 | O.K |
| OBS3 | 1 | 2.49 | 2.84 | 2.62 | O.K |
| | 2 | 2.64 | 2.89 | 2.76 | O.K |
| | 3 | 2.72 | 2.91 | 2.82 | O.K |
| | 4 | 2.75 | 2.89 | 2.82 | O.K |
| OBS4 | 1 | 1.26 | 1.45 | 1.32 | O.K |
| | 2 | 1.32 | 1.41 | 1.37 | O.K |
| | 3 | 1.35 | 1.53 | 1.41 | O.K |
| | 4 | 1.37 | 1.50 | 1.41 | O.K |
| OBS5 | 1 | 1.24 | 1.42 | 1.29 | O.K |
| | 2 | 1.31 | 1.43 | 1.38 | O.K |
| | 3 | 1.35 | 1.43 | 1.40 | O.K |
| | 4 | 1.36 | 1.43 | 1.41 | O.K |
| OBS6 | 1 | 2.43 | 2.74 | 2.58 | O.K |
| | 2 | 2.53 | 2.77 | 2.66 | O.K |
| | 3 | 2.61 | 2.80 | 2.71 | O.K |
| | 4 | 2.64 | 2.79 | 2.72 | O.K |
| OBS7 | 1 | - | - | - | - |
| | 2 | 1.03 | 3.12 | 2.62 | O.K |
| | 3 | 1.05 | 3.14 | 3.00 | O.K |
| | 4 | 1.10 | 4.20 | 3.44 | N.G |
| OBS8 | 1 | - | - | - | - |
| | 2 | - | - | - | - |
| | 3 | 1.13 | 3.53 | 2.77 | O.K |
| | 4 | 1.25 | 3.50 | 2.74 | O.K |
| OBS9 | 1 | - | - | - | - |
| | 2 | - | - | - | - |
| | 3 | - | - | - | - |
| | 4 | 1.08 | 1.25 | 1.19 | O.K |

2.3.3 관로내 난류강도 분석

각 관측지점별로 시간에 따른 단면평균 유속결과를 통하여, 각 Case 별 난류강도(Turbulent Intensity)를 산정하여(Eq. (9) 참조) Table 6에 제시하였다. 각 Case별 Reynolds 수의 범위는 3.2×10^5 (Case1) ~ 3.6×10^5 (Case 4)로, 모든 관거에서 완전발달 난류 흐름을 보였으며, 난류강도는 저류조 추가에 따라 관측지점별 단면 평균유속이 증가함에 따라 Reynolds 수가 증가하여 감소하는 것을 확인할 수 있다(Fig. 5 참조). 또한 토사가 우수관거로 유입 시 입자들 간의 물리적 점착력에 의하여 응집현상의 과정을 통하여 플럭(Floc)을 형성하거나, 난류강도에 의해 응집입자간의 충돌(collision)로 분산현상이 발생할 수 있다(Son, 2011; Choi, 2016), 따라서, 저류조가 증가함에 따라 단면의 평균유속은 증가하지만, 난류강도는 감소하기 때문에 저류조 추가 시 유입토사 플록형성에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

$$T.I = \sqrt{k_T / \bar{K}} \quad (9)$$

여기서, $k_T (= \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}))$ 는 난류운동에너지, $u', v', w' (= u - \bar{u}, v - \bar{v}, w - \bar{w})$ 는 x,y,z성분의 유속의 변동성,

$\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ 은 평균 유속, $\bar{K} (= \frac{\int_V \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2 + w^2) dV}{\int_V \rho dV})$ 는 질량가중 평균 운동에너지를 의미한다.

침전 여부를 판단하기 위하여, 관거 바닥 근처의 유속 수치모의 결과를 이용하여 바닥전단력(Bottom shear stress)을 산정하였다(Eq. (10) 참조)

$$\tau_b = \frac{1}{2} \rho C_f U_\delta^2 \quad (10)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도(kg/m^3)이며, C_f 는 마찰계수(0.01), U_δ 는 관거 바닥 근처의 유속(m/s)을 의미한다

FLOW-3D 수치모의의 수심에 따른 유속결과 중 관의 바닥 근처의 유속을 이용하여 산정한 바닥전단력은 Table 7에 제시하였다. 관거로 유입되는 토사의 입경이 1.0 mm로 가정할 경우, 한계 소류력(Critical Shear Stress)은 Eq. (11)을 이용하여 산정하면 $0.49 N/m^2$ 이며, 한계 소류력과 바닥전단력을 비교하여 하상전단력이 한계 소류력보다 작게 되면 침전이 발생하게 된다.

$$\tau_c = \tau_c^* (\rho_s - \rho) g d \quad (11)$$

여기서, τ_c^* 는 한계 전단력의 무차원 계수(Vanoni, 2006), ρ_s 는 토사의 밀도(kg/m^3), g 는 중력가속도(m/s^2), d 는 토사의 중앙입경(d_{50}, m)을 의미한다.

추가 저류조 설치로 인하여 바닥전단력은 증가하는 것을 확인하였고, OBS2 및 OBS5 지점과 같이 합류부 전에서도 한계 소류력보다 바닥전단력이 크게 나타나 토사의 침전은 발생되지 않을 것으로 판단된다. 하지만 저류조가 추가됨으로 인하여 난류강도 감소에 따른 플록형성으로 입경의 크기가 증가할 수 있어 이에 따른 추가검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. Turbulence intensity at each observation points for each case

| Case | T.I at OBS2 (%) | T.I at OBS3 (%) | T.I at OBS5 (%) | T.I at OBS6 (%) |
|------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 1 | 5.98 | 5.97 | 5.29 | 5.26 |
| 2 | 3.26 | 3.25 | 3.53 | 3.31 |
| 3 | 1.94 | 1.96 | 2.15 | 1.98 |
| 4 | 1.29 | 1.03 | 1.43 | 1.13 |

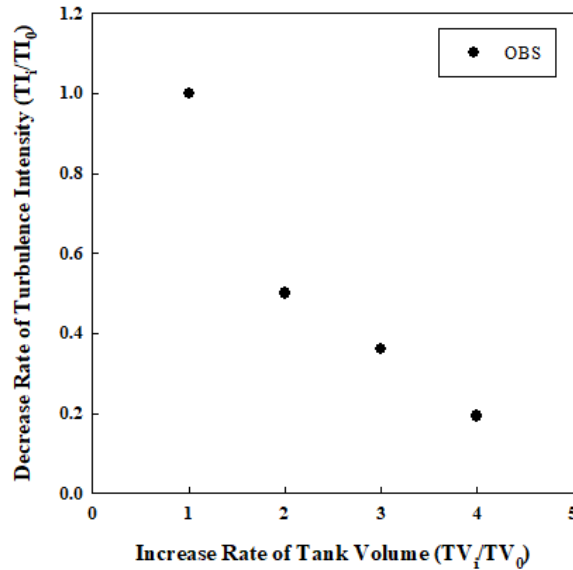


Fig. 5. Effect of tank volume on turbulence intensity

Table 7. Bottom shear stress at each observation point for each case ($d_{50} = 1.0 \text{ mm}$)

| Case | τ_b at OBS2 (N/m^2) | τ_b at OBS3 (N/m^2) | τ_b at OBS5 (N/m^2) | τ_b at OBS6 (N/m^2) | Sedimentation |
|------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------------|
| 1 | 0.48 | 0.84 | 0.48 | 0.84 | OK |
| 2 | 0.49 | 0.88 | 0.49 | 0.91 | OK |
| 3 | 0.49 | 0.92 | 0.50 | 0.93 | OK |
| 4 | 0.49 | 1.01 | 0.50 | 1.05 | OK |

2.3.4 관로내 동압 분석

FLOW-3D 수치모의 지점의 순간최대 유속결과(V_{impact})를 이용하여 합류부 및 합류 후에서의 동압을 산정하였다. 합류부에서는 원형관이 직각($\approx 92^\circ$)으로 연결되어 있어 Case 별 순간 최대 유속결과 및 산정한 동압은 Table 8과 Table 9에 제시하였다. 순간 최대유속을 이용하여 동압을 산정할 경우, 저류조 추가에 따라 관측지점별 유속이 증가하기 때문에 증가된 유속으로 인하여 관에 작용하는 동압도 증가하는 것을 확인하였다. 동압에 대한 구체적인 설계기준 값은 제시되어 있지 않으나, 일반적으로 우수관 설계에 사용되는 원심력 철근 콘크리트관(흙관)과 비교하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 흙관의 적용 가능한 내압의 크기는 보통 $1 \sim 10 \text{ kg}_f/cm^2$ 으로 각 관측지점별 동압은 약 $5.76 \sim 9.10 \text{ kg}_f/cm^2$ 이기 때문에 동압에 의한 관의 손상이 발생되지 않을 것으로 판단된다.

유속과 동일하게, 우수 저류조 용량에 따라 동압의 증가율을 검토하였다. Case 1의 동압(F_0) 및 저류조 용량(TV_0)을 기

준으로 OBS2 지점, OBS3 지점, OBS5 지점 및 OBS 6 지점에서 저류조가 추가됨에 따라 유속 증가에 따른 동압 증가를 확인할 수 있으며, 추가 저류조가 1개 이상이 될 때부터 동압의 증가율은 일정해지는 것을 확인하였다(Fig. 6 참조). 이를 통하여 추가 저류조를 설치할 경우 합류부 관에 작용하는 동압의 크기는 증가하기 때문에 이를 완화하기 위해서는 합류부 관의 보강과 같은 구조적인 정비보다는 비구조적인 방안인 유지관리의 강화로 대처하는 것이 필요하다고 판단된다.

Table 8. Impact velocity at each observation points for each case

| Case | V_{impact} at OBS2 (m/s) | V_{impact} at OBS3 (m/s) | V_{impact} at OBS5 (m/s) | V_{impact} at OBS6 (m/s) | Remarks |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------|
| 1 | 3.35 | 7.10 | 3.23 | 6.85 | - |
| 2 | 3.35 | 7.23 | 3.45 | 6.93 | - |
| 3 | 3.35 | 7.28 | 3.50 | 7.00 | - |
| 4 | 3.38 | 7.23 | 3.53 | 6.98 | - |

Table 9. Dynamic force at junction of pipes at each observation point for each case

| Case | OBS2 (kg_f/cm^2) | OBS3 (kg_f/cm^2) | OBS5 (kg_f/cm^2) | OBS6 (kg_f/cm^2) | Remarks |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---------|
| 1 | 6.19 | 8.88 | 5.76 | 8.26 | OK |
| 2 | 6.19 | 9.04 | 6.16 | 8.36 | OK |
| 3 | 6.20 | 9.10 | 6.25 | 8.45 | OK |
| 4 | 6.23 | 9.04 | 6.29 | 8.42 | OK |

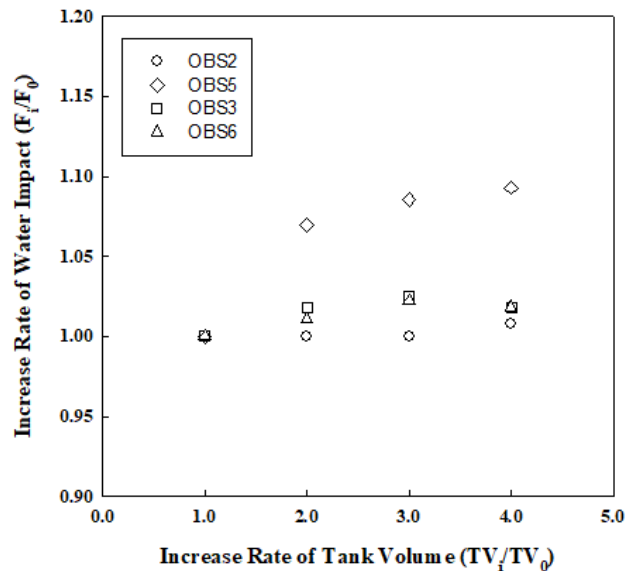


Fig. 6. Comparison of water impact increase with tank volume increase

3. 결론

본 연구에서는 회전교차로에서 LID 기법을 적용한 우수 저류조 설계 시 저류관망시스템의 흐름특성 및 안정성을 검토하기 위하여 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 활용하였다. 우수 저류조는 선행연구에서 사용되었던 설계제원을 활용하였으며, 우수 저류조에 유입되는 유량도 선행연구에서 제시한 강우강도식, 계획 설계빈도, 확률 년수, 유출계수를 활용하여 합리

식을 사용하여 도출하였다. 최종적으로 최적의 우수 저류조 설계방안을 도출하기 위하여 우수저류조의 수를 증가시켜 관내 흐름특성 및 동압의 변화를 검토하였다. 유량은 균등하게 유입된다는 가정으로 주요지점별로 평균유속을 검토한 결과, 관내 유속은 저류조가 증가할수록 빨라지는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 저류조의 증가로 인한 전체 용량의 증가가 배수를 원활하게 유도하기 때문이며, 또한 국내의 하수도시설기준에서 제시한 최소 유속(0.8 m/s)과 최대 유속(3.0 m/s)과 비교하였을 때 모든 관거에서 최소유속 이상의 유속이 발생하여 관거에 오물이나 유사가 침전되는 현상은 방지될 것으로 예상하였다. 그러나 추가 저류조 설치 시 저류조가 3개 이상(저류조 1개 대비 용량 4배 증가)일 경우 추가저류조관(OBS 7)에서 유속이 3.44 m/s로 유입수와 혼합된 유사가 관에 마모 손상을 일으킬 수 있으므로 적절한 저류조 용량의 증가방안을 도출하는 것이 중요하다 판단된다. 설계유속조건을 만족하는 우수저류조의 최적설계 방안을 도출을 위해 우수 저류조 용량에 따라 유속의 증가율을 검토하였으며, 추가 저류조가 2개 이상(저류조 1개 대비 용량 3배 증가)이 될 때부터 유속의 증가율이 일정해지는 것을 확인하였다. 이를 근거로 허용유속범위에서 추가 저류조는 최대 2개까지가 적절하다고 판단된다. 또한 FLOW-3D 수치 모의를 통하여 관로 내 난류강도에 대하여 검토한 결과, 저류조가 추가됨에 따라 난류강도는 감소하는 경향을 보였으며, 이를 통하여 저류조를 추가적으로 설치하는 것은 유사토입의 플록(Floc) 생성현상을 촉진시키므로 최적의 저류조 설치개소를 도출할 필요가 있으며, 토사의 한계 소류력과 바닥전단력을 비교한 결과 현재 설계 상태에서는 침전은 발생되지 않을 것으로 판단된다. 최종적으로 관내 순간최대 유속 결과를 이용하여 합류부(OBS2, OBS5) 및 합류후(OBS3, OBS6)에서의 동압을 산정한 결과, 동압 역시 저류조가 증가함에 따라 동압의 크기가 증가하는 것을 확인하였다. 최대 동압은 OBS2 지점에서 $6.23 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ (Case 4), OBS3 지점에서 $9.04 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ (Case 4), OBS5 지점에서 $6.29 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ (Case 4), OBS6 지점에서 $8.42 \text{ kg}_f/\text{cm}^2$ (Case 4)으로 일반적으로 우수관 설계에 사용되는 흙관과 비교하였을 경우 흙관의 적용 가능한 내압(1 ~ 10 kg_f/cm^2) 범위 보다 작기 때문에 동압에 의한 관의 손상은 발생되지 않을 것으로 판단된다. 본 연구 결과는 기후변화 및 관망의 노후화로 인하여 홍수위험이 커지고 있는 현시점에서 기존 관거의 유지관리 측면에서 기초자료로 활용될 수 있고, 향후 저영향 개발 기법을 적용한 저류조 설계 시 최적의 설계방안 도출에 이용할 수 있다. 다만 본 연구는 저류조의 제원, 우수의 유입량을 가정하여 사용하였고, 최적의 저류조 설계방안을 도출하기 위하여 단순히 동일제원의 저류조를 추가하여 검토하였다는 한계점은 분명히 있다. 이에 향후에는 다양한 저류조의 제원 및 우수 유입 시나리오를 적용 및 검토하여 보다 효율적이고, 효과적인 회전교차로 내 우수 저류조 설계방안을 도출하고자 한다.

Acknowledgement

본 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 지능형 도시수자원 관리사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (RE201903069).

References

- Choi, I. H. and Kim, J. W. (2016). A Study on Effects of Salinity on Deposition and Erosion of Cohesive Sediments. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 16: 317-324.
- Guo, Y. and Adams, B. J. (1998). Hydrologic Analysis of Urban Catchments with Event-based Probabilistic Models: Runoff Volume. *Water Resources Research*. 34(12): 3421-3431.
- Jia, H., Lu, Y., Shaw, L. Y., and Chen, Y. (2012). Planning of LID-BMPs for Urban Runoff Control: The Case of Beijing Olympic Village. *Separation and Purification Technology*. 84: 112-119.
- KEI (2014). LID Implementation Scheme for Environmental Impact Assessment.
- Kim, J. H., Lee, C. Y., and Joo, J. G. (2017). Evaluation of the Effect of Low Impact Development on the Subbasin-based

- Stormwater Reduction. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 17: 523-532.
- Korea Land & Housing Corporation (LH). (2010). A Study on the Feasibility Study of the Maximum Flow Rate Criterion for the Design of the Minimum Cost Superior Pipe Network.
- Lee, J. M. (2019). Stability Analysis of Steep-Sloped Sewer Manhole Using Observation Data and Numerical Analysis Model. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 19: 193-203.
- Liao, Z. L., Zhang, G. Q., Wu, Z. H., He, Y., and Chen, H. (2015). Combined Sewer Overflow Control with LID based on SWMM: An Example in Shanghai, China. *Water Science and Technology*. 71(8): 1136-1142.
- Luan, Q., Fu, X., Song, C., Wang, H., Liu, J., and Wang, Y. (2017). Runoff Effect Evaluation of LID through SWMM in Typical Mountainous, Low-lying Urban Areas: A Case Study in China. *Water*. 9(6): 439.
- Manual, F. U. (2011). Flow3D User Manual, v9. 4.2. Flow Science. Inc.. Santa Fe. NM.
- ME (2015). Standard of Sewer Facility. ME.
- ME (2017). Standard of Sewer Design. ME.
- MOLIT (2016). Development of Environment Friendly Early Rainwater Removal and Rainwater Storage Facility. MOLIT.
- Son, M. W. (2011). Research Trends on the Simulation of Cohesive Sediment. *Water for future*. 44(3): 51-58.
- Vanoni, V. A. (2006). *Sedimentation Engineering*. (Ed.). American Society of Civil Engineers.
- Wang, W. L., Li, J. Q., Gong, Y. W., Zhu, M. J., and Zhang, Q. K. (2012). LID Stormwater Control Effect Simulation based on SWMM. *China Water & Wastewater*. 28(21): 42-44.
- Yoon, E. H., Park, J. K., Shin, H. S., and Lee, J. H. (2017). Establishment of LID Demonstration Complex Monitoring System and Analysis of Storage Efficiency. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*. 17: 345-353.

Korean References Translated from the English

- 국토교통부 (2016). 초기 우수 대응을 위한 회전교차로 설계 및 시공 기술 개발. 국토교통부
- 김정호, 이채영, 주진걸 (2017). 저영향평가(LID) 기법의 적용에 따른 배수분구단위 우수유출저감 효과 평가. 한국방재학회 논문집. 17: 523-532.
- 손민우 (2011). 점착성 유사의 이동 모의에 관한 연구 동향. 물과 미래. 44(3): 51-58.
- 윤의혁, 박정규, 신현석, 이재혁 (2017). LID 실증단지 모니터링시스템 구축 및 저류 효율성 분석. 한국방재학회 논문집. 17: 345-353.
- 이정민 (2019). 실측데이터와 수치해석모형을 이용한 급경사지 하수도 맨홀 안정성 분석. 한국방재학회 논문집. 19: 193-203.
- 최인호, 김종우 (2016). 점착성 유사의 퇴적과 침식에 대한 염도의 영향에 관한 연구. 한국방재학회 논문집. 16: 317-324.
- 한국환경정책·평가연구원 (2014). 저영향개발(LID)기법의 환경영향평가 적용 방안.
- 환경부 (2015). 하수도 시설기준. 환경부.
- 환경부 (2017). 하수도 설계기준. 환경부.