



관로내 하수흐름의 전단응력 향상을 위한 저수조의 활용에 관한 수리적 고찰

Hydraulic consideration to improve the tractive force of sewage in sewer pipes using a storage tank

박규홍^{1*}·유순유²·이태훈¹
Kyoohong Park^{1*}·Soonyu Yu²·Taehoon Lee¹

¹중앙대학교 사회기반시스템공학부, 서울특별시 동작구 흑석로 84, 06974

²한국산업기술대학교 지식융합학부, 경기도 시흥시 산기대학로 237, 15073

¹Dept. of Civil Engineering at Chung-Ang University, 84 Heukseok-ro, Dongjak-gu, Seoul, Korea, 06974

²Dept. of Consilience, ADD at Korea Polytechnic University, Sangidaehak-ro, Siheung-si, Gyeonggi-do, Korea, 15073

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 121-129

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

ABSTRACT

If sewage flows for an extended time at low velocities, solids may be deposited in the sewer. Sufficient velocity or tractive force should be developed regularly to flush out any solids that may have been deposited during low flow periods. This study aims to evaluate the periods (T) during which sewage flow greater than the minimum tractive force maintains on a spot in sewer pipe system with lower tractive force or lower velocity than expected in the design step, when a storage tank installed in a place upstream pours water into the sewer. The effect to T of design factors of storage tank and sewer pipes was evaluated assuming the uniform flow in sewers. When the area of orifice in the storage tank is 0.062 m²(or 0.28 m diameter), the maximum T of 31sec was maintained using the usually used preset range of values of several design factors. As the horizontal cross section of storage tank and water depth of storage tank and roughness in sewers increase, T linearly increases. Also, T linearly decreases as the diameter of a sewer pipe increases. Although T gradually decreases as the sewer pipe slope decreases to around 0.005, T decreases sharply when the slope is less than 0.003.

Key words: Sewers, Tractive force, Storage tank, Sediments, Odor

주제어: 하수관로, 전단응력, 저수조, 침전물, 악취

1. 서 론

하수관로는 도시의 하수처리구역 안에 있는 가정이나 영업장 등의 생활오수를 관로에 수집하여 공공하수처리시설로 이송하는 시설이다. 또한 우천시에는 생활환경으로부터 빗물을 빨리 배제하도록 하여 도시

의 침수를 방지하는 중요한 기능을 한다. 일단 침수가 발생하면 그 피해가 막대하므로, 가능한 한 많은 유량을 관로에서 수용하여 신속히 배제하기 위해 배수면적에 내린 빗물의 고유량에 초점을 맞추어 관로를 설계해왔다. 하지만, 생활오수와 빗물을 함께 수용하는 합류식 하수관로에서 저유량시 퇴적되는 하수침전물로 인한 악취 등 생활악취에 대한 민원이 최근에 급증하고 있어, 합류식 하수관로 또는 우수관로 설계시

Received 8 October 2019, revised 22 February 2019, accepted 4 March 2019.

*Corresponding author: Kyoohong Park (E-mail: kpark@cau.ac.kr)

저유량의 조건에서도 악취발생 또는 퇴적물 발생을 최소화할 수 있는 설계 또는 운영방안에 대한 관심이 커져가고 있다 (Vongvisessomjai et al., 2010; Najafzadeh and Bonakdari, 2016; Ebtehaj et al., 2017).

하수도설계기준(MOE, 2017)에는 최소유속 기준으로 분류식 오수관로 0.6 m/sec, 합류관로와 분류식 우수관로 0.8 m/sec를 제시하고 있다. 서울시의 경우, 하수관로 악취와 부식 등의 문제점을 해소하기 위해 합류식 관로에 대해 청천시의 최소유속을 시간최대하수량에 대해 0.45 m/sec로 적용해왔다. 한편 서울시 하수관로 총연장의 64%가 청천시 최소유속 0.45 m/sec인 상황에서, 서울시(Seoul Metropolitan Government, 2009, 2017)의 연구에 따르면, 응암1배수분구의 총하수관로 연장은 25.51 km이며, 유속 0.45 m/sec 이하의 관로연장은 전체의 54.9%인 14.01 km, 초기관로(배수분구의 최상류부에 있는 공공하수관로로서, 통상 매우 적은 유량이 흐르는 관로) 유속 0.3 m/sec 이하의 초기관로 연장은 전체(8.19 km)의 51.2%이다. 이에 최소유속기준에 미달하나 지형 및 상하류관로의 여건상 유속확보가 어려운 관로는 중점유지대상으로 지정하여 지속적인 유지관리(연간 1회 이상 관로 준설)를 시행하며, 계획하수량에 의한 유속이 0.8 m/sec가 넘더라도 청천시 유속이 0.3 m/sec에 미달되는 관로를 중점유지대상에 포함시켜 관리하도록 제안하였다.

미국의 한 보고서에서 방류수역에 미치는 하수관로 월류수의 영향을 단순계산하였는데, 청천시 합류식 하수관로 내 퇴적물이 일일오염부하량의 5~30%의 범위인 것으로 보고하였다. 일일오염부하량의 25%가 하수관로에 퇴적되어있다면, 4일간의 무강우일 이후 2시간 지속되는 세찬 강우는 1일분의 하수를 처리없이 방류수역으로 배출하는 것과 같을 것이라고 추정하였다 (Pisano et al., 1998). 이렇게 합류식 하수관로 내 침전물이 공공수역의 수질에 미칠 수 있는 영향이 클 수 있으므로 하수관로 내 침전물의 퇴적이 방지될 수 있도록 관로를 설계하는 것이 중요한 이슈가 되어왔다. May et al. (1996)은 전통적인 방식인 최소유속 기반 설계법으로 설계된 하수관거 내에 침전물의 퇴적이 일어나지만, 하수량의 변화에 따라 부유사와 소류사의 형태로 침전물이 이동할 수 있다고 하였다. Butler and Clark (1995)는 하수관로 설계시, 우선 최대유량 기준으로 관로의 통수단면 등을 결정한 후, 최소유량 기준에 대한

최소유속 또는 전단응력이 확보되는지를 확인하여 경사를 결정하는 과정을 반복하여 계산하도록 함으로써 기존의 설계방법론을 보완할 것을 제안하였다. 그런가 하면 퇴적물이 전혀 존재하지 않는 수준까지의 보수적인 퇴적물 이송 설계법(Merritt, 2009; Vongvisessomjai et al., 2010)이 제안되기도 하였으며, 최근에는 일부 퇴적물을 허용함으로써 퇴적물의 이송과 경제적 효과의 장점을 고려한 설계방법론(Najafzadeh and Bonakdari, 2016; Ebtehaj et al., 2018)이 제안된 바 있다.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology (2014)에 의하면 최근 하수도 악취 민원의 주요 원인은 정화조라고 보고하였으며, 이에 Ministry of Environment (2015)는 하수도 악취개선 T/F(Task Force) 팀을 운영하며, 악취개선 시범사업 운영의 필요성을 제기하여, 악취저감시설의 설계시공유지관리 매뉴얼을 마련하였다. 2015년에 환경부와 서울시는 도심지역 하수도 악취 개선 시범사업을 시행하였다. 이 때 종로구, 은평구, 영등포구의 하수도 악취를 측정하여 악취지도를 제시하였으며, 악취저감대책으로 정화조에 공기 주입 또는 황산화 박테리아 주입 등의 악취저감기술을 적용하는 사업을 추진하였다. 하지만, 국내 하수관로의 다양한 수심, 유량의 변화에 따른 하수의 흐름의 실태에 대한 조사를 통해, 하수관로 경사의 부족 등 근본적인 구조적 문제에 대한 진단의 필요성 및 개선책 제시의 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 서울시는 2030 하수도정비 기본계획(Seoul Metropolitan Government, 2017)에서 기본방침 중 중점추진계획의 일환으로 수세변소수 직유입을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 분류식 지역의 관로정비를 통해 수세변소수 직유입이 가능하도록 정비하고, 합류식 지역은 소블럭 정비 시행에 따라 하수관로 정비구역으로 지정하고 개인하수처리시설 설치면제 및 방류수질기준(BOD 40 mg/L)이하 관리로 정화조를 폐쇄하는 것을 포함하고 있다. Korea Water and Wastewater works Association (2017)는 합류식지역의 정화조를 없애고 수세분뇨를 관로에 직접 투입하는 방안에 대한 연구를 수행하였으며, 서울시는 군자 2구역 소블럭 정비 시범사업을 통해 수세분뇨의 관로 직투입을 위한 기본계획을 수립하였고, 그 이후의 설계와 정비공사를 추진할 예정이다. 수세분뇨의 관로 직투입은 하수관로 내에 퇴적물 발생을 증가시키고 이에 따른 악취가 더욱 심해질 우려가 있다.



일단 시공이 완료된 상태의 하수관로시스템을 갖추고 있는 오래된 도시에는 이미 관경사가 완만하여 최소유속기준이나 최소전단응력을 만족하지 못하는 관로가 여러 곳에 산재하고 있다. 연속체의 형태로 연결된 하수관로의 경사는 어느 특정부위만 수정한다고 해서 하수흐름이 전체 시스템에서 원활히 개선되기는 어렵다. 이러한 지점의 하수 유속과 전단응력을 향상시키기 위해 저수조 등을 활용한 플러싱 방안에 대해 많은 기술들(KR 10-1833926, Miller의 Pacific Flush Tank, Van Vranken의 자동세척탱크 등)이 제안된 바 있으나, 실제로 현재 실용적으로 사용되고 있는 것은 거의 없는 듯하다.

본 연구에서는 저유량의 저유속의 관로지점에서 하수침적물의 퇴적을 최소화할 수 있는 최소전단응력의 발생시간을 설계 또는 운영의 항목으로 설정할 수 있는지의 가능성을 알아보았다. 이에 하수관로와 저수조의 여러 조건들이 변화할 때 하수흐름의 최소전단응력 발생시간의 변화를 수식화 및 도식화하여 표현하고 해석하였다.

2. 하수관로의 전단응력에 영향을 미치는 저수조와 하수관로 조건의 수식화

하수관로 내 하수침적물의 퇴적이 많이 일어나 악취의 원인이 되는 지점의 상류부에 저류조를 설치하여, 수시로 또는 악취가 심하게 나는 상황을 악취센서 등으로 계측하여 특정기준값을 넘으면 저류되었던 저수 퇴적물을 플러싱하는 상황을 고려하고자 한다 (Fig. 1 참조).

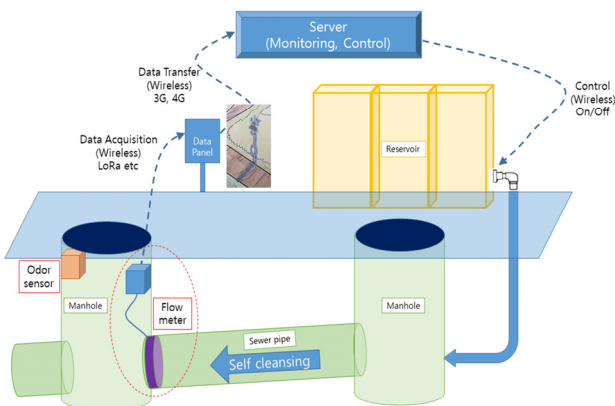


Fig. 1. Schematics of flushing sediments deposited on the bottom of sewer with water stored in water tank.

저수조의 단면이 A_s 이고 높이가 H 이고 바닥의 orifice의 넓이가 A_o 인 경우 저류조의 수위가 z 일 때 orifice로 나가는 물의 속도는 $\frac{1}{2}v^2 = gz$ 이고 시간당 orifice를 통한 유출량은 $Q = A_o v$ 임과 동시에 $Q = -A_s \frac{dz}{dt}$ 이다.

$$A_o v = -A_s \frac{dz}{dt} = -A_s \frac{d}{dt} \frac{v^2}{2g} = -\frac{A_s}{g} v \frac{dv}{dt} \text{ 이므로,}$$

$$v = v_0 - \frac{A_o}{A_s} g t. \text{ (단, } v_0 = \sqrt{2gH} \text{)}$$

그러므로 orifice를 통해 나가는 물의 속도 v 와 유량 Q 는 다음과 같다.

$$v(t) = \sqrt{2gH} - \frac{A_o}{A_s} g t$$

$$Q(t) = A_o v = A_o \left(\sqrt{2gH} - \frac{A_o}{A_s} g t \right) \quad (1)$$

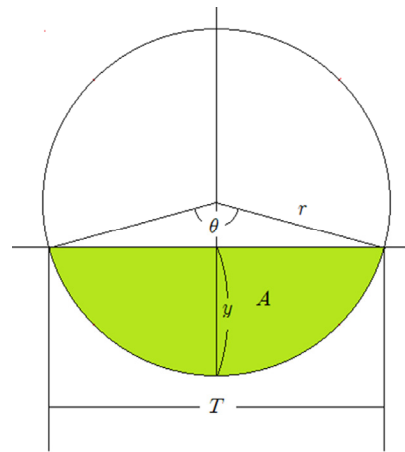


Fig. 2. Cross section of a circular sewer pipe with water depth y of and diameter D .

저류조의 물이 orifice를 통해 하수관로로 유입되면서 관 경사에 의한 에너지 증가분과 마찰에 의한 손실이 같으며(등류를 가정함) 관에 물이 없다고 가정하면, orifice로부터 공공하수관(본 논문에서는 원형관으로 가정)으로 유입된 물의 통수 단면은 A_o 로 그대로 유지되므로 다음이 성립한다.

관의 통수단면

$$A = A_s = \pi r^2 \frac{\theta}{2\pi} - \frac{1}{2} r^2 \sin \theta \quad (2)$$

$$= \frac{1}{2} r^2 (\theta - \sin \theta) = D^2 (\theta - \sin \theta) / 8$$

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 121-129

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

관의 수위

$$y = r(1 - \cos(\theta/2)) \quad (3)$$

경심(hydraulic radius)

$$R = \frac{A}{\tau\theta} = \frac{2A}{D\theta} \quad (4)$$

한편, 평균전단응력 식 $\tau_0 = \rho g R S_0$ 은 자연 유하인 경우에 적용되는 식인데, 지금 문제의 경우는 자연 유하가 아니라 토출된 속도 $v(t)$ 가 의미 있는 양이므로 이를 속도의 함수로 나타낼 필요가 있을 것이다. 매닝 공식 $v = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2}$ 으로부터

$$\tau_0 = \rho g R S_0 = \rho g R (nv)^2 R^{-4/3} = \rho g n^2 v^2 / R^{1/3} \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입해 정리하면

$$\tau_0 = \frac{\rho g n^2 v^2}{(2A_o/D\theta)^{1/3}} = \frac{\rho g n^2}{(2A_o/D\theta)^{1/3}} v^2 \quad (6)$$

식(6)에서 orifice의 넓이와 관경의 제곱 D^2 의 비를 $\eta = A_o/D^2$ 라 정의하면 η 는 충분히 작은 값이고 $\eta < \frac{1}{2}$ 인 영역에서 식 (2)를 다음과 같이 근사적으로 표현할 수 있다.

$$\theta \approx 2(6\eta)^{1/3} + \frac{4}{5}\eta + \frac{24}{1050}(6\eta)^{5/3} \quad (7)$$

식 (6)에 식 (1)과 식(7)을 대입하여 정리하면 다음의 결과를 얻는다(식 (7)의 우변 세 번째 항 생략).

$$\tau_0 = \frac{\rho g n^2}{D^{1/3}(2\eta^{4/3}(2(6)^{1/3}/\eta^{2/3} + 4/5))^{1/3}}, \quad \left(\sqrt{2gH} - \frac{A_o}{A_s}gt\right)^2 \quad (\eta = A_o/D^2) \quad (8)$$

유량 $Q = A_o v = A_o \left(\sqrt{2gH} - \frac{A_o}{A_s}gt\right)$ 가 토출 후 자연유 하하면서 등류에 도달한다고 가정하면, 속도가 $v_f = \frac{1}{n} R^{2/3} S_0^{1/2}$ 가 되어야 하고 이는 유체의 단면이 변해야 함을 의미한다. 변화된 단면을 A 라 하면 다음이 성립한다.

$$Q = A_o v = A v_f \quad (9)$$

식 (2), (3), (9)로부터 다음이 성립한다.

$$n A_o v / S_0^{1/2} = R^{2/3} A = R^{2/3} R D \theta / 2 = R^{5/3} D \theta / 2 \quad \equiv \eta^{5/3} D^{8/3} \theta / 2, \quad (\eta = R/D) \quad (10)$$

식 (10)를 편의를 위해 다음과 같이 정의하자.

$$\eta^{5/3} \theta / 2 = n A_o v_i / (D^{8/3} S_0^{1/2}) \equiv k \quad (11)$$

식 (11)에서 η 역시 θ 의 함수이고 식(2)를 역으로 전개하면 다음을 얻으며

$$\theta \approx 2\sqrt{6\eta} + \frac{6}{5}\sqrt{6}\eta^{3/2} \quad (12)$$

이를 식 (11)에 대입해 역 전개하면 다음을 얻는다.

Table 1. Minimum tractive force criteria in designing sewers proposed in literatures (Vongvisessomjai et al., 2010)

Source	Country	Sewer type	Minimum shear stress (N/m ²)	Pipe flow conditions
Lysne (1969)	USA		2.0~4.0	
ASCE (1970)	USA		1.3~12.6	
Yao (1974)	USA	Storm	3.0~4.0	
		Sanitary	1.0~2.0	
Maguire rule (CIRIA 1986)	UK		6.2	Full/half full
Lindholm (1984)	Norway	Combined	3.0~4.0	
		Separate	2.0	
Scandiaconsult (1974)	Sweden	All	1.0~1.5	1.5 if sand is present
Macke (1982)	Germany	Sanitary	Depends on transport capacity and concentration	0.1 to full typical combined sewers under long term conditions
		Storm		
		Combined		
Brombach et al. (1992)	Germany	Combined	1.6 to transport 90% of all sediments	



$$\eta = \frac{R}{D} \approx \left(\frac{k}{6}\right)^{6/13} - \frac{3}{65} 6^{(7/13)} k^{12/13} \quad (13)$$

식(13)로부터 다음과 같이 전단응력을 설계값들의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\tau = \rho g R S_0 = \rho g S_0 D \left(\frac{n A_o \left(\sqrt{2gH} - \frac{A_o}{A_s} g t \right)}{6 D^{8/3} S_0^{1/2}} \right)^{6/13} \quad (14)$$

여러 문헌에 제시된 하수관 설계시 최소전단응력 기준을 Table 1에 정리하였다.

최선의 설계 기준은 여러 관점에서 볼 수 있겠으나 간단히 생각하여 ‘퇴적물을 이송할 수 있는 최소전단 응력을 얼마나 오래 유지할 수 있는가’로 설계 기준으로 설정하기로 하자.

본 논문에서는 Brombach et al. (1992)의 기준을 따라, $\tau_0 = 1.6 \text{ N/m}^2$ 을 기준으로 하는 경우를 가정하여 식(12)가 τ_0 이상을 유지하는 시간은 다음과 같이 정리하였다.

$$T = \frac{A_s}{A_o^2 g} \left(\sqrt{2gH} A_o - \frac{6 D^{8/3} S_0^{1/2}}{n} \left(\frac{\tau_0}{D g \rho S_0} \right)^{13/6} \right) \quad (13)$$

3. 연구 방법

저수조의 물을 흘려보낼 때 하수관로의 퇴적물 이송가능 최소전단응력 유지시간이 어떻게 산정되는지 알아보기 위하여, 저수조와 하수관로의 여러 변수들의 기본값을 설정하고, 이 값들이 변화할 때 최소전단응력 유지시간의 변화를 살펴보고자 한다. 일차적으로 저수조의 기본값으로 수평단면적을 6 m^2 , 수심을 2 m 으로 설정하였고, 하수관로의 기본값으로 관경은 450 mm , 조도계수는 0.013 , 관경사는 0.001 , 하수의

밀도는 $1,000 \text{ kg/m}^3$ 로 설정하였다. 저수조의 물을 흘려보내는 오리피스 직경은 0.28 m 에서 최소전단응력 유지시간 T의 최댓값을 가짐을 중간결과로서 알게 되어, 그 이후의 분석에서는 이의 근사값인 0.30 m 를 기본값으로 설정하여 민감도분석을 수행하였다. 민감도 분석에 사용된 각 변수값의 범위를 Table 2에 나타내었다. 민감도분석을 위한 계산은 mathematica를 이용하였다.

4. 연구결과 및 고찰

4.1 저수조의 조건에 따른 하수침전물 이송가능 전단응력 유지시간

저수조의 수심, 수평단면적, 오리피스의 크기가 변화하는 경우에 대해 하수침전물 이송가능 전단응력 유지시간의 변화를 알아보았다.

$A_s = 6 \text{ m}^2$, $H = 2 \text{ m}$, $D = 450 \text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$ 를 주어진 조건으로 하여 A_o 의 변화에 따른 T의 변화는 Fig. 3과 같다. 이러한 조건에서 오리피스의 면적이 증가함에 따라 하수침전물이 이송될 수 있는 최소전단응력 T가 증가하다가 어느 한계값을 넘어 서면 감소하는 경향을 보인다. 오리피스 면적이 0.062 m^2 (해당 직경은 $d = 0.28 \text{ m}$)인 경우에 하수침전물이 이송될 수 있는 최소전단응력이 유지되는 시간의 최댓값이 31.1 sec 임을 알 수 있다. 오리피스 면적이 0.062 m^2 보다 작을 때에는 T가 매우 급하게 감소한다. 한편, 오리피스 면적이 0.062 m^2 보다 크고 약 0.15 m^2 보다 작을 경우에는 급하게 감소하여 약 20 sec 에 이르게 되며, 오리피스 면적이 약 0.15 m^2 이상인 경우에는 T 값이 완만하게 감소하여 $10 \sim 15 \text{ sec}$ 의 범위에서 유지되는 것으로 추정할 수 있다.

Table 2. Variational range of parameters of sewer pipe and storage tank

Basic value of	Range of parameters
Storage tank $H=2 \text{ m}$	1 m, 1.5 m, 5 m, <u>2 m</u> , 2.5 m, 3 m
$A_s=6 \text{ m}^2$	4 m ² , 5 m ² , <u>6 m²</u> , 7 m ² , 8 m ²
$d=300 \text{ mm}$	150 mm, 200 mm, 250 mm, <u>300 mm</u> , 400 mm, 500 mm
Sewers $D=450 \text{ mm}$	200 mm, 300 mm, <u>450 mm</u> , 600 mm, 800 mm, 1000 mm
$S_0=0.001$	<u>0.001</u> , 0.005, 0.010, 0.015, 0.020
$n=0.013$	0.012, 0.0125, <u>0.013</u> , 0.0135, 0.014

pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 121-129
pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 009-016
pp. 009-016

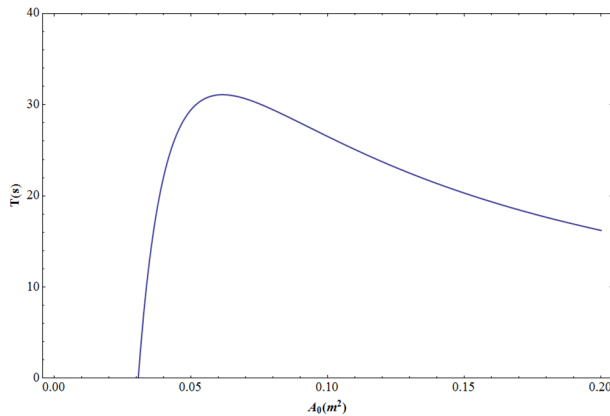


Fig. 3. Variation of T with change of cross sectional area of orifice in storage tank. ($A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$)

오리피스(口)의 안지름(d)을 0.3 m로 단순화하고, $A_s = 6\text{ m}^2$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$ 의 조건에서 저수조의 수심 H가 변화할 때, 최소전단응력 유지 시간의 변화를 구하면 Fig. 4와 같다. 상기 조건에서 저류조의 수심 H가 증가함에 따라 T는 거의 선형적 증가를 보인다. H가 2 m일 때 T가 약 52 sec인데, H가 1 m로 감소하면 T는 약 36 sec로, H가 3 m로 증가하면, T는 약 64 sec로 증가함을 알 수 있다.

한편, $A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$, $d = 0.3\text{ m}$ 의 조건에서, 저류조의 수평단면적 A_s 가 변하는 경우 $T = 5.1A_s$ 로 비례 관계에 있다. 이때에 T의 단위는 [sec]이며, A_s 의 단위는 [m^2]이다.

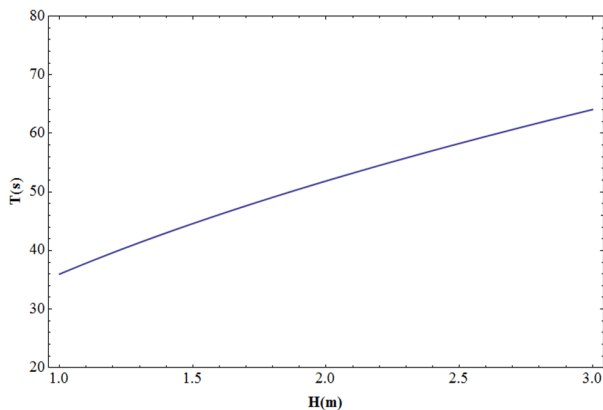


Fig. 4. Variation of time maintained at greater than the minimum tractive force with change of water depth in storage tank. ($A_s = 6\text{ m}^2$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$, $d = 0.3\text{ m}$)

저수조 오리피스(口)의 관경에 따라 최소전단응력 유지 시간(T)이 달라지며 특정조건에서의 T값을 최대로 확보할 수 있는 오리피스(口)의 관경을 확보할 수 있었다. 본 연구에서 수행된 결과는 오리피스(口)의 관경이 281 mm 일 때 T의 최대값을 가지는 것으로 나타났으나 기존 규격화된 관경을 고려하였을 때 D250관경보다 D300관경이 최소전단응력을 더 길게 확보할 수 있는 것으로 산정되었다. 하지만 그 차이가 크지 않아 경제성을 고려한 최적 관경은 관로의 자재비 및 공사비 단가 등을 이용한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

4.2 하수관로의 조건에 따른 하수침전물 이송가능 전단응력 유지시간

하수관로의 관경사, 관경, 조도계수가 변화하는 경우에 대해 하수침전물 이송가능 전단응력 유지시간의 변화를 알아보았다.

$A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$, $d = 0.3\text{ m}$ 일 때, 관경사 S_0 와 T의 관계는 Fig. 5와 같다. 관경사가 0.005이상일 경우에는 T가 53.5 sec를 넘어서 54 sec에 접근함을 알 수 있다. 관경사가 0.005미만인 경우엔 T가 서서히 감소하다가, 0.03미만이 되면서 급격히 감소한다.

Fig. 6에는 D와 T의 관계를 나타내었다. $A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$, $d = 0.3\text{ m}$ 의 조건에서 관경이 증가함에 따라 T가 거의 선형적으로 감소함을

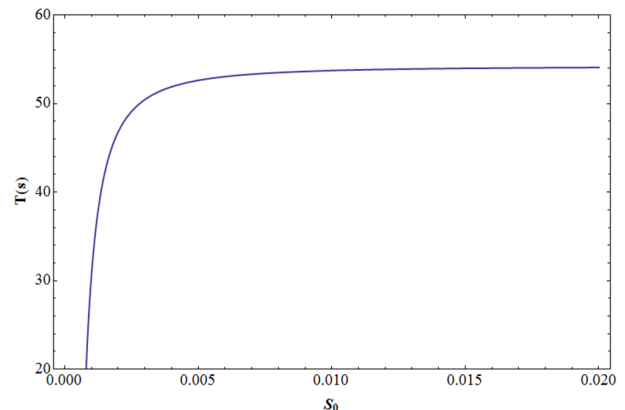


Fig. 5. Variation of time maintained at greater than the minimum tractive force with change of water depth in storage tank. ($A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $n = 0.013$, $d = 0.3\text{ m}$)



pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 121-129

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

pp. 009-016

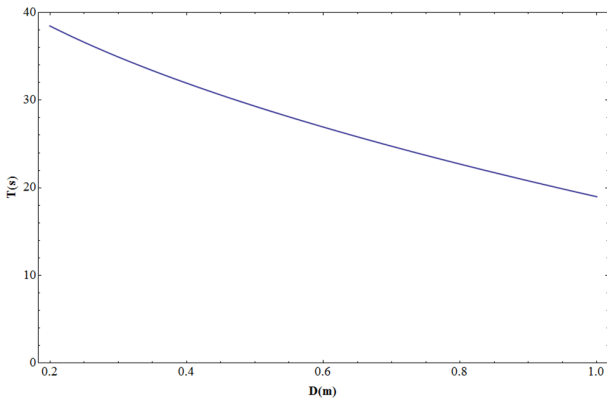


Fig. 6. Variation of time maintained at greater than the minimum tractive force with change of diameter of sewer pipe. ($A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$, $d = 0.3\text{ m}$)

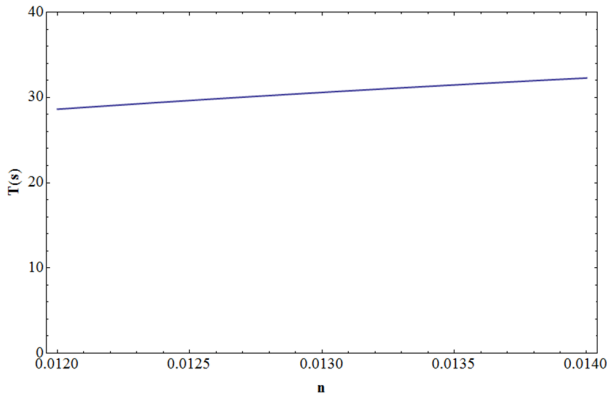


Fig. 7. Variation of time maintained at greater than the minimum tractive force with change of Manning's roughness coefficient. ($A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $d = 0.3\text{ m}$)

보인다. 관경 300 mm에서는 T가 35 sec이며, 관경 450 mm인 관에서는 T가 30 sec, 관경 600 mm관에서는 약 26 sec, 관경 800 mm관에서는 22 sec임을 알 수 있다.

관의 조도계수 n 와 T 의 관계는 Fig. 7에 나타내었다. $A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $d = 0.3\text{ m}$ 의 조건에서, Manning의 조도계수 n 이 증가함에 따라 T 는 선형적으로 증가함을 보인다. 조도계수가 0.012에서 0.014의 범위에서 증가할 때 T 는 28~32 sec의 범위에서 증가하여 관의 조도계수가 T 에 큰 영향을 주지 않음을 알 수 있다.

하수관로의 경사, 관경, 조도계수에 변화에 따른 T 의 최적값을 산정하였다. 관경사의 경우 T 값이 0~0.005(5%) 구간에서는 급격히 상승하였으나 0.005

(5%) 이후로는 큰 변화를 나타내지 않는 것으로 나타났다. 하수관로의 관경의 경우 관경이 커짐에 따라 T 값이 선형으로 감소하는 것으로 나타났다. 관 내부의 거칠기 정도를 나타내는 조도계수의 경우도 마찬가지로 조도계수가 커짐에 따라 T 값이 선형으로 감소하는 것으로 나타났다.

하수관로내 이러한 연구결과는 하수내 고형물이 퇴적될 수 있는 가능성을 가지는 하수관로시스템에서 퇴적된 고형물을 배제할 수 있는 별도의 저수조를 설치하는 경우 기존 하수관로의 정보(관경, 관경사, 조도계수)를 이용하여 저수조의 규모를 산정하는 데에 기초자료로 사용될 수 있다. 또한 향후 퇴적물이 이송되는데 요구되는 T 값의 범위가 도출되는 경우 본 연구에서 도출된 최적의 오리피스 관경, 관경사, 하수관로의 관경 및 조도계수 등을 산정하는 방법을 통해 최적의 저수조 설계 및 하수관로 설계가 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 저류조의 물이 orifice를 통해 하수관로로 유입되면서 관 경사에 의한 에너지 증가분과 마찰에 의한 손실이 같을 것이라는 등류 가정과 함께, 하수관로 내 기존의 하수흐름이 없다는 가정 하에서 계산이 이루어졌다. 하지만, 실제 상황에서는 하수관로의 원래의 유량이 존재할 수 있으며, 저류조의 물이 흘러내려가면서 등류에 도달하기에는 많은 시간과 유량이 필요할 수 있다. 부등류 조건, 특히 점변류의 특성을 가질 수 있는 실제상황에 가까운 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구에서는 하수관로의 침전물의 퇴적을 최소화할 수 있는 전단응력 $\tau_0 = 1.6\text{ N/m}^2$ 이상이 유지되는 시간에 대해 저수조의 설계항목(수심, 수평단면적, 오리피스 직경)과 하수관로의 상태항목(조도계수, 관경사, 관경)이 미치는 영향에 대해 알아보았다. 이를 위하여 미리 설정한 설계변수들의 기본값을 설정하고, 저수조의 조건과 하수관로의 조건을 변경에 따른 하수관로 내에 퇴적된 하수침전물을 부유 후 이송 가능하도록 하는 최소전단응력 유지시간 T 를 산정하였다.

저수조의 조건을 변경하는 경우 $A_s = 6\text{ m}^2$, $H = 2\text{ m}$, $D = 450\text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$ 조건하에서 저수조

에서 하수관로로 연결되는 오리피스스의 환경 변화에 따른 하수침전물 이송가능 T값을 산정한 결과는 오리피스스의 환경이 280 mm일 때 T값이 가장 길게 나타내며 이보다 환경이 작거나 커지면 T값이 줄어드는 것으로 나타났다.

하수관로의 조건을 변경하는 경우 $A_s = 6 \text{ m}^2$, $H = 2 \text{ m}$, $D = 450 \text{ mm}$, $S_0 = 0.001$, $n = 0.013$, $d = 0.3 \text{ m}$ 조건 하에서 관경사(S_0), 하수관로의 관경(D), 조도계수(n)의 변화에 따른 하수침전물 이송가능 T값을 산정하였다. 그 결과 관경사의 경우 0.005(5%)일 때 가장 긴 T값을 나타냈으며 하수관로의 관경의 경우 D300일 때 가장 긴 T값을 나타냈다. 조도계수의 경우 우상향의 그래프가 도출되었으나 조도계수가 0.012부터 0.014로 변화함에 따른 T값의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 한국연구재단의 지원(NRF-2017M3C1B6 070095)을 받아 진행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

기 호

- H 저류조의 높이
- n 매닝의 조도계수
- A_s 저류조의 수평단면적
- ρ 유체의 밀도
- z 저류조의 수위
- R 경심(hydraulic radius)
- A_o orifice의 넓이
- y 하수관의 수위
- D 하수관의 관경
- g 중력 가속도
- r 하수관의 반경
- θ 관에서 수위에 대응되는 중심각
- η orifice의 넓이와 관경의 제곱의 비 A_o/D^2

References

- ASCE and WPCF. (1970). *Design and construction of sanitary and storm sewers*, American Society of Civil Engineers
- Manuals and Reports on Engineering Practices, No. 37.
- Butler, D. and Clark, P. (1995). *Sediment Management in Urban Drainage Catchments* (No. 134).
- Brombach, H., Michelbach, S., and Wohrle, C. (1992). *Sedimentation- und Remobilisierungsvorgänge NEIDERSCHLAG*, Eigenverlag Umwelt- und fluidtechnik GmbH, Bad Mergentheim.
- CIRIA. (1986). *Sediment Movement in Combined Sewerage and Storm-water Drainage Systems*. Phase 1. Project Report.
- Ebtehaj, I., Bonakdari, H. and Zaji, A.H. (2018). A new hybrid decision tree method based on two artificial neural networks for predicting sediment transport in clean pipes, *Alex. Eng. J.*, 57, 1783-1795.
- Kim Y.R., Whang S.H., Yoon S.Y., Shim J.Y., and Jung J.A., Seoul Metropolitan Government. (2013). *Performance analysis and quality improvement measure of comprehensive sewage pipe rehabilitation projects*.
- Lindholm, O.G. (1984). "Pollutant loads from combined sewer systems", *Proceedings of the 3rd International Conference on Urban storm drainage*, Gothenburg, Sweden, Almqvist & Wiksell International, 1602-1616.
- Lysne, D.K. (1969). Hydraulic design of self-cleaning sewage tunnels, *J. Sanit. Eng. Division*, 95(SA1), 17-36.
- Macke, E. (1982). "About sedimentation at low concentrations in partly filled pipes", *Mitteilungen, Leichtweiss-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig*, Braunschweig, Deutsche.
- May, R.W., Ackers, J.C., Butler, D., and John, S. (1996). Development of design methodology for self-cleansing sewers, *Water Sci. Technol.*, 33(9), 195-205.
- Merritt, L.B. (2009). Tractive force design for sanitary sewer self-cleansing, *J. Environ. Eng.*, 135(12), 1338-1347.
- Najafzadeh, M. and Bonakdari, H. (2016). Application of a neuro-fuzzy GMDH model for predicting the velocity at limit of deposition in storm sewers, *J. Pipeline Syst. Eng. Pract.*, 8(1), 06016003.
- Park, K.H., Oh, J.I., Yoo, S.Y., Kang, B.J., Lee, T.H., Kang, S.J., and Kim, S.M., Korea Water and Wastewater Works Association. (2017). *Study of sewage direct input plan in the combined sewer zone*.
- Pisano, W.C., Barsanti, J., Joyce, J., Sorensen, H., and Fan, C.Y. (1998). *Sewer and tank sediment flushing, case studies*, US EPA, Office of research and development, National Risk Management Research Laboratory, USA.
- Scandiaconsult (1974). *Synopsis of Research Programme for Self-cleansing Sewers*. Stockholm: Orrje.



Vongvisessomjai, N., Tingsanchali, T., and Babel, M.S. (2010). Non-deposition design criteria for sewers with part-full flow, *Urban Water J.*, 7(1), 61-77.

Yao, K.M. (1974). Sewer line design based on critical shear stress, *J. Environ. Eng. Division*, 100(2), 507-520.

Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology. (2014). *Development of odor control technology and policy making in sewer Pipe*, 414-111-008, 2.

Ministry of Environment. (2015). *Manual of design, construction and maintenance for sewage odor reduction Ffacilities*, Plan for case study of sewer odor mitigation in city center, 1.

Ministry of Environment. (2017). *Sewer design standards*, KDS, 64 40 00 : 2017, 45.

Seoul Metropolitan Government. (2009). *The optimal minimum flow rate for preventing the deposition of the combined sewer pipe in DWF condition according to change of reoccurrence interval*, 225-233

Seoul Metropolitan Government. (2017). *2030 Sewer rehabilitation master plan*, N-11.

pp. 009-016	
pp. 009-016	
pp. 009-016	
pp. 121-129	
pp. 009-016	
pp. 009-016	
pp. 009-016	
pp. 009-016	