



청천시 오수량을 고려한 합류식 하수도 소류력 설계법과 이를 활용한 하수관거 개보수방안

A combined sewer design method using tractive force considering wastewater flow on non-rainy days and its application for improvement methods of sewer

지현욱·유성수·송호면·강정희*

Hyon Wook Ji·Sung Soo Yoo·Homyeon Song·Jeong-Hee Kang*

한국건설기술연구원 국토보전연구본부

Department of Land, Water and Environment Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

pp. 169-182

pp. 183-190

pp. 191-200

pp. 201-210

pp. 211-220

pp. 221-230

ABSTRACT

When domestic sewage and rainwater runoff are discharged into a single sewer pipe, it is called a “combined sewer system.” The sewer design standards in Korea specify the flow velocity based only on the volume of rainfall; therefore, sedimentation occurs on non-rainy days owing to the reduced flow rate and velocity. This sedimentation reduces the discharge capacity, causes unpleasant odors, and exacerbates the problem of combined sewer overflow concentration. To address this problem, the amount of sewage on non-rainy days, not just the volume of rainfall, should also be considered. There are various theories on sedimentation in sewer movement. This study introduces a self-cleansing velocity based on tractive force theory. By applying a self-cleansing velocity equivalent to the critical shear stress of a sand particle, sedimentation can be reduced on non-rainy days. The amount of sewage changes according to the water use pattern of citizens. The design hourly maximum wastewater flow was considered as a representative value, and the velocity of this flow should be more than the self-cleansing velocity. This design method requires a steeper gradient than existing design criteria. Therefore, the existing sewer pipelines need to be improved and repaired accordingly. In this study, five

Received 27 May 2020, revised 15 June 2020, accepted 17 June 2020.

*Corresponding author: Jeong-Hee Kang (E-mail: kangjeonghee@kict.re.kr)

- 지현욱 (박사후연구원) / Hyon Wook Ji (Postdoctoral Researcher)
경기도 고양시 일산대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 유성수 (수석연구원) / Sung Soo Yoo (Senior Researcher)
경기도 고양시 일산대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 송호면 (연구위원) / Homyeon Song (Research Fellow)
경기도 고양시 일산대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea
- 강정희 (박사후연구원) / Jeong-Hee Kang (Postdoctoral Researcher)
경기도 고양시 일산대로 283, 10223
283, Goyang-daero, Ilsanseo-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do 10223, Republic of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

types of improvement and repair methods that can maximize the use of existing pipelines and minimize the depth of excavation are proposed. The key technologies utilized are trenchless sewer rehabilitation and complex cross-section pipes. Trenchless sewer rehabilitation is a popular sewage repair method. However, it is complex because the cross-section pipes do not have a universal design and require continuous research and development. In an old metropolis with a combined sewer system, it is difficult to carry out excavation work; hence, the methods presented in this study may be useful in the future.

Key words: Combined sewer, Sedimentation, Odor, Tractive force, Self-cleansing

주제어: 합류식 하수도, 퇴적, 악취, 소류력, 자가세정

1. 서 론

하수도는 하수·분뇨의 유출 및 처리·이용, 그리고 슬러지처리·이용의 기능을 가진 것으로 침수 예방과 생활환경 개선 및 수질보전이 주요 역할이다 (Ministry of environment, 2017a). 이 중 생활구역으로부터 하수를 배재하기 위해 지하에 하수관거를 매설하는데, 배재방식에 따라 분류식 하수도와 합류식 하수도로 구분한다. 분류식 하수도는 오수관과 우수관이 별도로 매설되고, 합류식 하수도는 하나의 관에서 오수와 우수를 함께 이송한다. 분류식은 오수만을 처리장으로 이송하기 때문에 처리장 운영과 우천시 하천에 오수를 방류하는 일이 없어서 수질 관리상 유리하다. 그러나 오염도가 높은 초기우수가 하천에 직접 방류된다는 점, 오수관의 매설깊이가 깊어지는 점, 관로의 종류가 두 가지다보니 시공의 복잡성이 올라간다는 점 등의 단점이 있어 상황에 따라 분류식과 합류식이 사용된다 (Lee et al., 2008).

그러나 최근 우리나라는 하수 배재 방식을 분류식으로 전환하려고 하고 있다. 신도시는 대체로 분류식 하수도를 선택하고 있고, 부산시의 경우 2011년부터 합류식 하수도를 분류식으로 변경하는 대규모 하수관로 정비 사업을 시행했다. 우리나라의 수도인 서울시는 합류식 하수도를 사용하고 있고, 부분적으로 분류식으로 하수를 배재하고 있으나, 말단은 우수토실을 거쳐 차집관거로 연결하고 있기 때문에 사실상 합류식 하수도라고 볼 수 있다. 하수도통계(Ministry of environment, 2016)에 의하면 서울시의 총 하수관로가 10,615 km로 부산시 8,516 km보다 길고, 복잡도가 높아 분류식으로 전환하는 공사가 어려운 실정이다.

서울시는 합류식을 유지할 수밖에 없는 상황인데, 우리나라 합류식 하수관거 설계에는 단점이 있다. 하

수도설계기준(Ministry of environment, 2017b)에 의하면 합류식 하수관거의 유속기준은 계획우수량 조건에서 유속이 0.8 m/s 이상, 3 m/s 이하로 규정한다. 우리나라의 연평균 강수량은 1,277 mm이고, 그 중 50~60%가 여름에 내리는 대한민국에서는 오수량이 우수량의 1%도 안 되는 곳이 대부분이다. 우수량과 오수량의 차이가 커서 계획우수량에서의 유속 조건은 만족하지만, 청천시 유량과 유속이 줄어들어 강우시 유입된 잔존 물질과 청천시 오수량이 함유하고 있는 입자성 물질들이 퇴적되어 통수능력이 감소하고, 악취가 발생하며(Ji and Yoo, 2018), 합류식 하수도 월류수(Combined Sewer Overflow; CSO)의 농도를 악화시킨다 (Ahyerre and Chebbo, 2002; Beichert, 1992). 이런 이유로 합류식 하수관로에서 청천시 오수량을 고려한 설계방안 도입의 필요성이 제기되고 있다.

현행 하수도 설계기준에는 유속을 Manning's equation, Kutter equation, Hazen-Williams equation의 3가지 공식으로 구하도록 한다. 이 공식들은 퇴적과 침식에 관한 이론이 아니다. 청천시 퇴적문제를 설계에 반영하기 위한 다양한 하수관 설계 이론들이 개발되었다. 하수관에서 고체 입자를 운반할 수 있는 힘을 소류력(Tractive force)이라고 하며, Haestad et al. (2004)은 비중 2.7의 모래입자가 갖는 임계전단력을 제시하였고, 이것 이상의 힘이 하수 내에 존재할 때 소류력에 의한 자가세정(Self-cleansing)이 발생한다고 하였다.

1996년에 발간된 CIRIA Report(Ackers et al., 1996)는 그동안 개발된 하수관에서의 퇴적물 이동에 관한 이론들을 정리했고, 퇴적을 제한적으로 허용하도록 하여 퇴적현상에 대해 관대하지만 유속 및 경사에 대해서는 기존 설계보다 엄격한 기준을 제시하였다. 설계의 주 원리는 관경에 따른 최소유속과 동수경사로 주어지는 수리적 성능과 퇴적물의 이동성에 관한 기



준의 조합으로 설명된다. 퇴적물의 이동 형태는 소류사와 부유사로 구분되고, 이들의 이동 특성에 따라 침강속도, 퇴적물의 농도, 점착성 등을 계산한다. 그러나 기존 하수도 설계 방법과의 연결성 문제, 국내 하수도 환경과의 적합성 여부, 혹은 청천시 유량에 대한 적합성 여부에 대해서는 연구가 필요하기 때문에 본 연구에서는 소류력 이론을 적용한 설계방법을 소개한다.

새로운 설계기준은 퇴적 문제를 감소시킬 목적이기 때문에 기존 설계기준보다 더 엄격한 기준이 되어야 하며, 그로 인해 하수도는 더 큰 경사로 설계되고, 교체되어야 한다. 그러나 서울시와 같은 대도시의 모든 하수관에 새로운 경사 기준을 적용하기에는 막대한 예산이 필요하기 때문에 적용이 힘들다. 이를 위해서 굴착 및 경사 조정을 절감하는 하수관거 개보수 방안을 제시하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 소류력과 자가세정유속

소류력은 관 내 물이 입자를 움직이는 힘이고, 식 (1)의 물의 전단응력이 식 (2)의 입자의 임계전단응력 (Haestad et al., 2004) 이상일 때 소류력이 발생한다 (Bizier, 2007). 물의 전단응력과 임계전단응력이 동일해지는 시점에서의 유속을 자가세정유속(Self-cleansing velocity)이라고 한다. 자가세정유속 설계는 식 3과 같이 청천시 오수량의 유속이 자가세정유속 이상이 되도록 설계하는 것이다.

$$\tau = \gamma R_h S \quad (1)$$

$$\tau_c = 0.867d^{0.277} \quad (2)$$

청천시 오수량에서의 유속 \geq 자가세정유속 (3)

τ 는 물의 전단응력(N/m²), γ 는 물의 비중량(N/m³), R_h 는 동수반경(m), S 는 하수관의 경사, τ_c 는 임계전단응력, d 는 2.7의 비중을 갖는 입자의 지름(mm)이다. 임계전단응력과 물의 전단응력이 같은 조건이라면, 식 (4)의 Manning's equation의 동수반경을 전단응력과 관련된 항으로 치환할 수 있고, 그 결과 자가세정유속은 식 (5)와 같다 (Enfinger and Mitchell, 2010).

$$v = \frac{1}{n} R_h^{2/3} S^{1/2} \quad (4)$$

$$v_{sc} = \frac{1}{n} \left(\frac{\tau_c}{\gamma} \right)^{2/3} S^{-1/6} \quad (5)$$

v 는 유속(m/s), n 은 Manning's 조도계수, v_{sc} 는 자가세정유속(m/s)이다. 이 설계방법의 장점은 현재 하수도설계기준에서 제시하고 있는 Manning's equation과 호환이 되어서 기존 설계방법의 변동이 거의 없다는 것이다. 또한 특정 유량을 대상으로 하지 않아, 다양한 유량 조건에 대해서 유연하게 적용할 수 있다. Fig. 1은 식 (5)를 이용해서 관경과 유량에 따라 자가세정유속을 만족하는 경사를 구하는 계산 흐름을 보여준다. 구하고자 하는 하수관로의 n , γ , τ_c , D , Q 를 결정하고, 임의의 S 와 내각 θ 를 넣는다. 동수반경과 유수면적을 계산하고, S 를 넣어서 계산한 값들과 θ 넣어서 계산한 값들을 비교하고, 이들이 일치할 때 까지 S 와 θ 를 조정하여 시행착오를 반복한다.

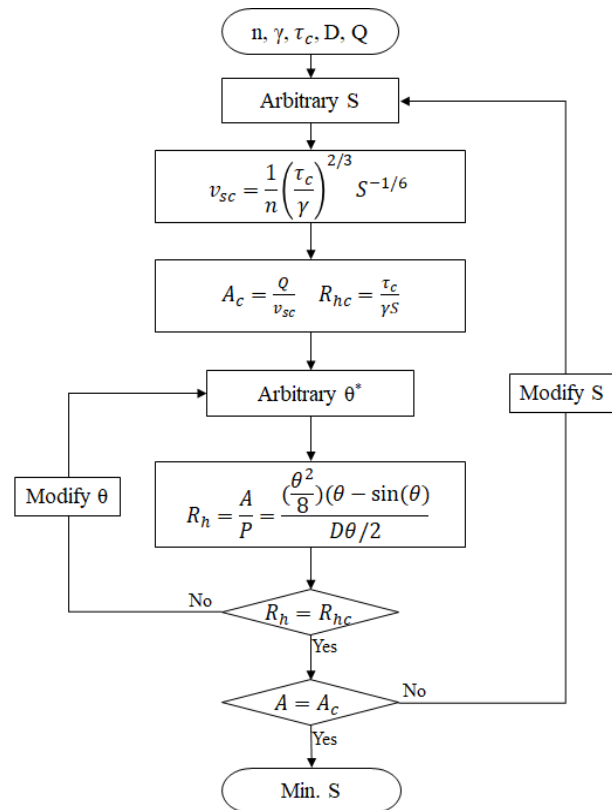


Fig. 1. Flow chart to calculate minimum slope of sewer pipes satisfying self-cleansing velocity.

* θ : Central angle of arc which is wetted perimeter.

하수의 설계유속을 결정하는 중요 요인은 설계경사이다. 하수도 경사 설계에 소류력과 자가세정유속기준을 적용하기 위해서는 하수도설계기준에 해당 내용이 반영 되어야 한다. 본 연구는 현행 하수도설계기준에서 경사를 설계하기 위한 절차에서 소류력과 자가세정유속기준이 필요한 부분을 설정하였고, 이를 반영하여 설계흐름도를 작성하였다.

새로운 하수도설계기준이 도입되면 신규 하수도 공사지역은 적용이 용이하지만, 노후화 및 기타 파손으로 인한 하수도 개보수 대상지는 예산을 고려해서 개보수 방안을 결정해야 한다. 합류식 하수도에서 청천시 오수량에 대해 소류력을 적용하는 설계방법은 기존의 우수량만을 고려할 때 보다 좀 더 다양한 방안을 고려하는 것에 대한 논증을 뒷받침해 준다. 청천시 오수량이 매우 적다는 것과 Manning's equation에서 동수반경이 유속을 결정하는 요인 중 하나이기 때문이다. 이러한 원리를 이용하여 하수관의 조도계수나 동수반경을 상승시켜 굴착 및 경사조정을 최소화할 수 있는 개보수 방안을 제안하였다.

2.2 연구지역

서울시 S동에 위치한 테스트베드(Fig. 2)는 합류식 하수도 사용 지역이며, 하수도의 하류가 1개의 우수토실로 직접 연결되고, 토구는 중랑천으로 연결되어 있다. 유역면적 2.85 ha, 하수관거 총연장 1.7 km, 하수관로 58개, 맨홀 47개, 인구 약 1,700명이 거주한다. 하수관의 90% 이상이 준공연도가 30년 이상으로 하수도 정비가 필요한 지역이다.

하수도가 시작하는 초기관로가 16개로, 총 관로 중

27.5%가 초기관로에 해당한다. 초기관로가 많아 오수량이 적고, 낮은 유속으로 인해 모든 관로가 퇴적되었고, 퇴적의 단면적이 평균 8%이다. 경사가 거의 없는 평탄 지역이며, 하수관로 중 가장 긴 구간의 시점과 종점맨홀의 관저고 차이가 3.26 m이고, 평균 경사는 0.008로 낮다. 토구가 유역의 서쪽으로 중랑천과 연결되어 있지만, 지대가 비교적 높아 침수피해는 최근 30년간 기록된 바 없다.

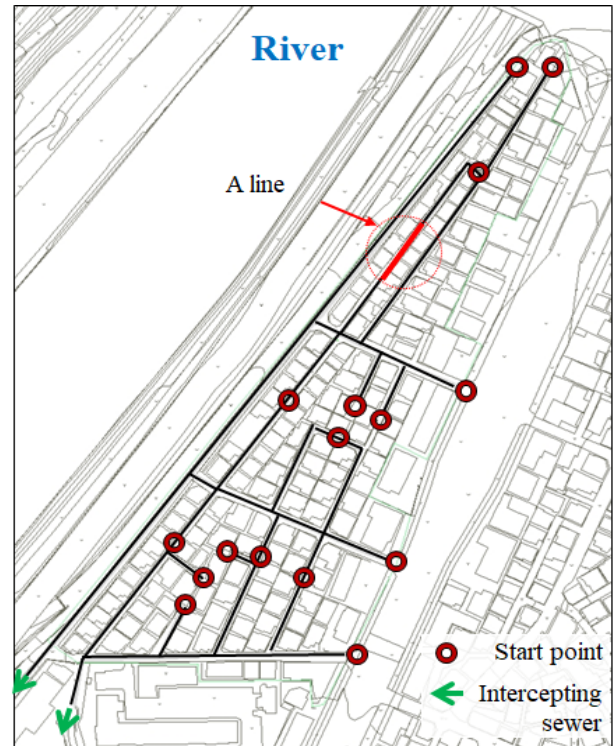


Fig. 2. Sanitary sewer network of test-bed in Seoul, South Korea.

Table 1. Specification and design discharge of A line in test-bed

Item	Quantity	Description
Diameter of pipe	450 mm	By investigation
Length	35.03 m	By investigation
Slope (S)	0.00628	By investigation
Manning's roughness coefficient (n)	0.013	Hum pipe
The number of residents	110 person	By investigation
Design hourly maximum wastewater flow (Q_d)	0.000963 m ³ /s	By calculation
Runoff coefficient (C)	0.9	Pavement
Design rainfall intensity (I)	221.5 mm/h	Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2020
Watershed drainage area (A)	700 m ²	By investigation
Design volume of rainfall (Q_r)	0.0388 m ³ /s	By calculation



테스트베드의 하수관은 준공년도가 오래되어 정비가 필요하지만, 경사가 좋지 않아 기존의 하수도설계 기준 및 기술로는 퇴적 및 악취를 방지할 수 있는 수준의 유속을 만들기 어려운 실정이다. 본 연구는 58개의 하수관로 중 하나인 Fig. 2의 A line에 본 연구에서 제시하는 자가세정유속과 개보수를 위해 제시하는 기술들을 예시로 적용하여 유속 개선 효과를 나타내었으며, A line 하수관로의 현황은 Table 1과 같다.

3. 결과 및 토의

3.1 하수도설계기준 반영안

자가세정유속 기준을 도입한 설계절차는 Fig. 3과 같다. 오수량과 우수량을 각각 산정한 후 유량에 부합하는 하수관을 설계한다. 오수량의 설계기준은 계획시간최대오수량이고, 계산 방법은 두 가지가 있다. 1인 1일 급수량으로부터 시작해서 생활오수량, 지하수량, 공장 폐수 및 기타 배수량 등을 계산해서 합하는 방법과 Babbit 계수를 이용해서 구하는 방법이 있다. Babbit 계수는 계획시간최대오수량을 구하기 위해 1일평균오수량에 곱해지는 상수로서, 배수인구가 1,000명 미만일 때 5, 100만명 초과일 때 1.25이고, 지수적으로 감소한다.

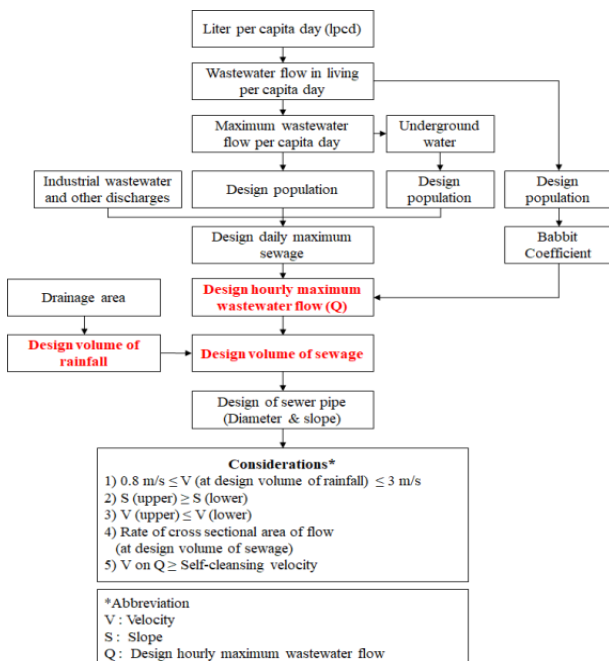


Fig. 3. Design procedure for sanitary sewer pipe including self-cleansing velocity theory.

계획오수량은 합리식을 이용해서 배수면적대비 오수량으로 결정한다. 계획오수량과 계획시간최대오수량을 더하면 우천시 계획하수량이 된다. 하수관거 설계시 주요 유량 기준은 계획시간최대오수량, 계획오수량, 우천시 계획하수량의 세 가지이다. 이를 바탕으로 다섯 가지 항목에 대해서 유속, 경사, 여유율을 검토한다. 경사는 하류로 갈수록 작아져야 하고, 유속은 빨라져야 한다. 유속의 검토는 청천시와 우천시 모두 검토하도록 하고, 우천시에 우선순위를 두어야 한다. 우천시 외부로부터 유입물이 많고, 유량 또한 많아 유속이 느려지는 구간에서 퇴적이나 침수의 우려가 있을 수 있기 때문이다. 여유율은 현행 기준에서 특정하게 규정하고 있지 않지만, 대체로 100% 이상으로 하고 있어 별도의 검토가 필요하다. 그리고 계획오수량에 대한 유속 기준과, 계획시간최대오수량에서의 자가세정 유속 기준을 만족해야 한다.

설계절차는 신설관로보다는 기존관로를 개보수할 때 더욱 만족시키기 어렵다. 개보수 구간의 시점과 종점에서의 관저고가 고정되어 있어, 그 안에서 가능한 경사를 설계해야 한다. 다섯 가지 검토사항을 모두 만족시킬 수 없을 때에는 상황에 따라 우선순위를 정해서 최선의 경사를 선택해야 한다.

3.2 자가세정유속의 최소경사

소류력 혹은 자가세정유속을 만족하는 최소 조건은 식 (1)과 식 (2)가 같은 경우이며, Fig. 1에 의하여 최소경사를 계산할 수 있다. Bizier(2007)에 따라 설계입자 크기는 1 mm로 하고, 관경 450 mm, 600 mm, 900 mm인 콘크리트관(Manning's coefficient : 0.013)에 적용하면 소류력을 만족하는 최소경사는 Fig. 4와 같다. 유량에 따라 필요한 경사는 변화하고, 유량이 작아질수록 높은 경사가 필요한데, 유량이 '0'이 된다면 소류력이 발휘될 수 없고, 유량이 '0'으로 접근할수록 경사는 무한히 커진다. 유량이 커질수록 경사는 작아지는데, 0.001과 0.002 사이로 수렴한다. 그래프보다 낮은 영역의 유량-경사는 소류력을 만족하지 못하고, 그래프보다 높은 영역에 있는 유량-경사는 소류력을 만족한다.

자가세정유속을 Table 1의 조건을 가진 Fig. 2의 테스트베드에 위치한 하수관로 중 하나인 A line에 적용하였다. 설계의 단순화를 위해 미래 추정치를 사용하지

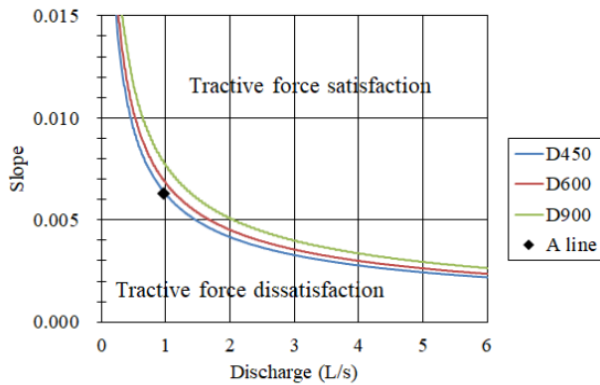


Fig. 4. Minimum slope satisfying tractive force about design particle 1 mm in concrete sewer pipes (diameter 450, 600, and 900 mm) and condition of A line.

않고, 현재 상태를 기준으로 하였다. 합리식 $Q=0.2778CIA$ 를 이용해서 계획오수량을 구하면 $0.0388 \text{ m}^3/\text{s}$ 이고, 식 (4)에 의해 유속은 1.06 m/s 로 현 상하수도설계기준의 최저유속 0.8 m/s 를 만족한다.

서울시 1일 1인당 급수량이 335 lpcd (K-water, 2019) 를 적용하고, 하수도설계기준 정의에 따라 오수전환율 90%, 생활오수량은 1인 1일 최대오수량의 80%, 지하수량은 1인 1일 최대오수량의 20%, 소규모 지역이나 관광지 기준인 침투부하율 2를 적용하고, 거주인원 110명을 기준으로 계획시간 최대오수량은 $0.000963 \text{ m}^3/\text{s}$, 유속은 0.351 m/s 이다. Bizier(2007)에 따라 소류력의 설계입자 크기를 1 mm 로 하면, 식 (5)에 의해 이 하수관의 자가세정유속은 0.356 m/s 로, 현재 경사로는 자가세정유속을 만족하지 못한다. Fig. 4에서 A line의 계획시간 최대오수량과 경사는 최소경사그래프의 아래 영역에 위치하여 소류력을 만족하지 못하는 것을 확인할 수 있다. A line의 최소경사는 0.0064 로, 자가세정유속을 만족하기 위해서는 경사를 상향해야 한다. 이처럼 청천시 자가세정유속 기준은 기존의 최저유속기준보다 상향된 기준이다.

3.3 자가세정유속을 고려한 개보수 방안

상하수도설계기준의 유속기준 보다 가파른 경사를 요구하는 자가세정유속 기준을 현 하수관거에 적용하여 개보수를 고려한다면 상당히 많은 하수관거가 경사 재조정 대상에 해당할 것이다. Fig. 1의 테스트베드의 경우 60% 이상이 경사 재조정 대상이다. 그러나 대상 지역의 도로가 좁고 지하층을 가진 주택이 많아 통행 방해 및 다수의 민원이 예상되고, 전선, 상수도, 가스관, 통신선이 하수관로 인근에 함께 매설되어 있어 굴착 및 경사 조절 공사의 난이도가 상승하고, 그로 인해 공사품질이 저하될 가능성이 높다.

본 연구는 굴착 및 경사 재조정을 최소화하면서 계획시간 최대오수량에서의 자가세정유속을 만족시킬 수 있는 다섯 가지 방안을 Table 2에 제시하였다. 개보수 방안을 선택하기 위한 조건은 자가세정유속과 CCTV 조사에 의한 관 상태 평가 결과이다. Fig. 3에 의하여 계획시간 최대오수량을 산정하고, 이때의 최소경사 혹은 자가세정유속을 계산한다. 현 상태의 경사나 계획시간 최대오수량에서의 유속이 최소경사나 자가세정유속보다 클 뿐만 아니라 CCTV 조사 결과 하수관의 노후화가 덜 되었고, 파손이 없다면 그대로 둔다. 자가세정유속은 만족하나 관이 노후화되었으면 비굴착 공법을 이용해서 보수한다. 비굴착공법은 굴착 없이 하수관을 보수하는 공법으로 국내에서는 현장경화관(Cured-In-Place Pipe; CIPP) 공법을 주로 사용한다 (Ji et al., 2020). 자가세정유속을 약간 만족하지 못하지만 단면 조절로 극복할 수 있는 수준이며, 관의 상태가 좋다면 간이복합단면을 적용한다. 자가세정유속을 만족하지 못하고, 관의 상태도 좋지 않다면 복합단면 하수관으로 굴착교체한다. 자가세정유속을 단면 조절만으로 만족하지 못할 정도로 하수관의 경사가 낮다면, CCTV 조사의 결과와 무관하게 복합단면 하수관

Table 2. Five alternative for improvement or repair of sanitary sewer pipe to minimize excavation

No.	Sewer pipe condition		Improvement or repair method
	Self-cleansing velocity	Condition	
1	Good	Good	Keep
2	Good	Not good	Rehabilitation
3	Not good	Good	Insert complex cross section by trenchless method
4	Not good	Not good	Complex cross sectional pipe
5	Very not good	Doesn't matter	Complex cross sectional pipe and slope adjustment



으로 굴착교체 하면서 경사 조정을 함께 수행한다.

아래에는 개보수 방안의 주요 기술이면서 소류력을 증가시키는 간이복합단면과 복합단면 하수관에 대해서 소개하였다.

3.3.1 간이복합단면

자가세정유속이 약간 미달되나 관 상태가 양호하다면 관을 교체한다는 것은 사회적 비용을 고려한 경제성 측면에서 적절하지 않다. 그러나 자가세정유속 미달로 평상시 퇴적이 지속적으로 있어왔기 때문에 악취가 발생할 것이고, 시민 생활에 불편함을 유발할 수 있다. 간이복합단면은 비굴착공법으로 시공하여 사회적 비용을 유발하지 않고 동수반경을 조절하여 유속을 증가시킬 수 있다.

Fig. 5는 내경이 450 mm인 콘크리트하수관용으로 설계한 간이복합단면이다. 청천시 오수가 흐르는 수로는 직경이 150 mm이다. Manning's equation에 의해 유속이 동수반경의 2/3승에 비례함에 따라 간이복합단면에 의해 청천시 유속이 최대 30%까지 증가할 수 있다. 간이복합단면의 전체 길이는 500 mm로 1호 맨홀에서도 작업이 가능하며, 양 날개에 인버트와 같은 10% 구배가 있어 하수나 협잡물이 고이지 않고 중앙의 수로로 흘러내려올 수 있다. 간이복합단면을 PVC로 만든다면 조도계수가 감소하여 유속을 더욱 증가시킬 수 있다.

Table 3은 A line에 PVC 재질의 간이복합단면을 시공하기 전과 후의 상태에 대해서 유속 및 자가세정유속 등을 계산하였다. 유량조건은 Table 1에 따라 청천시에는 계획시간 최대오수량 0.963 L/s, 우천시에는 계획오수량 0.0388 m³/s를 적용하였다. 시공하기 전 콘크리트 하수관에서의 청천시 유속은 0.351 m/s이고, 자가세정유속 0.356 m/s보다 작아서 소류력을 만족하지 못한다. 반면 PVC 간이복합단면의 Manning's coefficient 0.01을 적용

하면 청천시 유속이 0.491 m/s로 상승하고, 자가세정유속 0.462 m/s보다 커서 소류력을 만족하게 된다.

우천시 콘크리트 하수관에서는 유속이 1.06 m/s, 여유율이 336%이고, PVC 간이복합단면을 적용하면 유속이 1.19 m/s, 여유율이 227%이다. 간이복합단면을 설치함으로써 우천시 통수능이 다소 감소하나, 간이복합단면의 면적은 하수관 면적의 6%를 차지해서 통수능에 큰 영향을 끼치지 않는다.

Fig. 6은 가공이 용이한 stainless steel로 간이복합단면을 제작하여 비굴착공법으로 테스트베드의 A line에 설치한 모습이다. 사람이 맨홀에 들어가서 500 mm 길이의 간이복합단면을 밀어 넣었고, 각 간이복합단면은 볼트로 연결하였고, 연결부를 방수재료를 사용하여 마감처리 하였다. 시공 초기에는 사람의 힘으로 밀어 넣을 수 있지만, 시공 연장이 10 m가 넘어가면 사람이 직접 밀어 넣는 것이 쉽지 않아 반대편 맨홀에서 윈치를 이용해서 견인했다. 시공이 끝난 후 간이복합단면의 시점과 종점을 콘크리트로 마감하여 간이복합단면을 고정하고, 하수도설계기준에 따라 인버트는 하류 하수관의 연장이기 때문에 상부 맨홀의 인버트를 간이복합단면 형상으로 현장 타설하여 시공하였다.

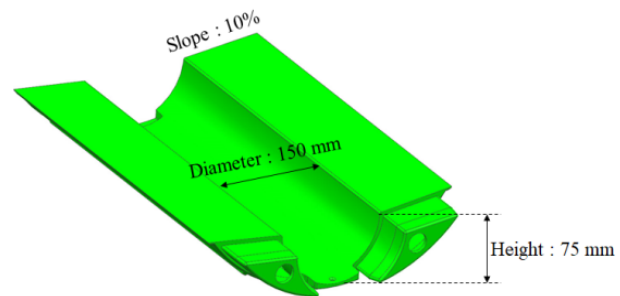


Fig. 5. 3-D design of complex cross section to install by trenchless method in D450 mm pipe.

Table 3. Discharge capacity and self-cleansing velocity by pipe condition of A line in test-bed

Kind of pipe	Concrete pipe		PVC complex cross section	
	non-rainy [†]	rainy [†]	non-rainy	rainy
Weather condition				
Velocity (m/s)	0.351	1.06	0.491	1.19
Water level (mm)	21.2	126	25.1	140
Allowance rate (%)	-	336	-	277
Self-cleansing velocity (m/s)	0.356	-	0.462	-

[†]Condition of Design hourly maximum wastewater flow

[‡]Condition of Design volume of rainfall



Fig. 6. Test-bed installation of complex cross section using stainless steel.

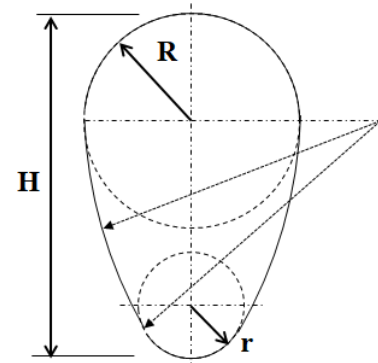
3.3.2 복합단면 하수관

자가세정유속을 만족하지 못하면서 관의 상태가 불량하면 굴착 교체를 해야 하는데, 경제성을 높이기 위해 굴착 깊이를 최소화 하는 방안을 지향해야 한다. 복합단면을 사용하면 Table 3과 같이 계획시간최대오수량에서의 유속이 0.351 m/s에서 0.491 m/s로 증가한다. 만약 직경 450 mm 원형관을 그대로 사용하면서 동일한 유속을 얻기 위해서는 경사를 0.0165까지 높여야 하고, 그 결과 종점 관저고에서 361 mm 더 굴착을 해야 한다. 적용 구간이 35.3 m 한 구간이기 때문에 추가 굴착 깊이가 알지만, 1 km의 하수관을 굴착 교체한다고 가정하면, 종점에서 굴착 깊이가 최대 10.2 m까지 상승할 수 있다. 그러므로 기존관을 교체할 때는 복합단면을 사용하여 굴착 깊이를 최대한 적게 하는 것이 경제적이다.

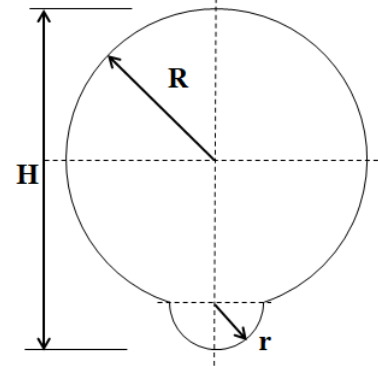
복합단면은 원형관이나 사각형관 같이 한 가지 형상을 갖는 것이 아니라, 여러 가지 단면이 중첩되어 구성되는 단면이다. 하수관이 개발된 이래로 다양한 형상의 단면이 사용되어 왔는데, 본 연구에서는 하부에 작은 반원형의 보조관을 갖는 복합단면을 적용하고자 한다.

하부에 작은 복합단면을 가질 수 형태는 다양하다. Fig. 7 (a)는 난형관으로 하부를 보조관으로 볼 수 있고, (b)는 원형관에 보조관을 부착하였고, (c)는 말발굽형에 보조관을 부착하였다. 주관의 반지름이 R이라면 보조관의 반지름은 r이다. 청천시 오수가 보조관에서만 흐르도록 설계하기 때문에, 관 전체의 형상에 상관없이 청천시 유속의 해석은 반지름이 r인 반원형의 보

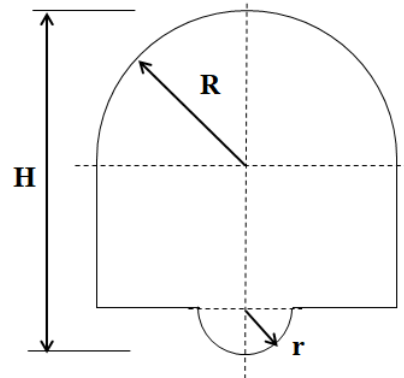
조관으로 수행한다. 보조관을 갖는 콘크리트 복합단면 하수관은 청천시 보조관으로만 오수가 흘러서 동수반경의 증가로 유속이 간이복합단면과 같은 수준으로 증가하지만, 재질이 콘크리트이기 때문에 조도계수의 감소로 인한 유속증가는 없다. 반면 주관에 보조관이 붙는 형태라서 원형관에 비해 관의 넓이가 넓어져서 통수단면이 증가하여 우천시 여유율이 증가한다.



(a) (Regueiro-Picallo et al., 2016)



(b)



(c)

Fig. 7. Shapes of complex cross sectional pipe having sub pipe. H: height, R: radius of main pipe, r: radius of sub pipe.



Fig. 8. Mock-up test of complex cross section concrete pipe.

난형관은 하수도용 불포화 폴리에스테르 수지 콘크리트 난형관(SPS-KWWA M 212-7342)이 2019년에 한국상하수도협회에 의해서 단체표준으로 지정되어 앞으로 사용이 가능할 것이다. 반면 Fig. 7 (b)는 연구가 이루어지고 있으며, 최근에 Fig. 8과 같이 mock-up test가 진행되었다.

4. 결 론

청천시의 퇴적을 고려한 자가세정유속 설계법은 Manning's equation 공식과 연계가 가능해 기존의 설계방법을 변경하지 않고 사용할 수 있으며, 청천시 자가세정유속 기준만 추가하면 된다는 장점이 있다.

청천시 자가세정유속 설계법은 기존 설계기준인 계획우수량에서의 유속 0.8~3 m/s를 만족하는 경사보다 높은 경사를 요구한다. 이 새로운 설계법을 기존의 하수관로에 적용하면 기준에 미달되는 관로들은 경사를 다시 잡기 위해 굴착공사를 해야 한다. 대도시이며 인구밀도가 높고 도로가 좁은 지역일수록 복잡한 지장물 및 민원으로 굴착공사가 어렵기때문에, 되도록 굴착을 하지 않거나, 굴착 깊이를 최소화해야 한다.

본 연구는 그 대안으로 동수반경을 조절하여 유속을 증가시키는 간이복합단면과 복합단면 하수관을 제안하였다. 이 기술들은 원형관에 비하여 청천시에 높

은 유속을 갖기 때문에 원형관에 비하여 굴착 깊이를 저감할 수 있다. 간이복합단면은 기존관에 삽입 설치하는 기술로, 비굴착 시공이 가능하고, 테스트베드에 설치되었다. 복합단면 하수관은 샘플 제작은 되었지만, 샘플에 대한 성능 검증이 필요하며, 대량 생산 방안이 마련되어야 현장에서 사용이 가능할 것이다.

사 사

본 연구는 환경부 환경정책기반공공기술개발사업으로 한국환경산업기술원(과제번호 : 2017-0007-00001)의 지원을 받았습니다.

References

- Ackers, J.C., Butler, D. and May, R.W.P. (1996). Design of sewers to control sediment problems, London, Construction Industry Research and Information Association.
- Ahyerre, M. and Chebbo, G. (2002). Identification of in-sewer sources of organic solids contributing to combined sewer overflows, *Environ. Technol.*, 23(9), 1063-1073.
- Beichert, J. (1992). Influence of sewer sediments on the overflow load for various combined sewer systems, *Water Sci. Technol.*, 25(8), 217-224.
- Bizier, P. (2007). *Gravity sanitary sewer design and construction*. American Society of Civil Engineers and Water Environment Federation, Reston, VA, United State.
- Enfinger, K.L. and Mitchell, P.S. (2010). "Scattergraph principles and practice: evaluating self-cleansing in existing sewers using the tractive force method", *World Environmental and Water Resources Congress 2010: Challenges of Change*, 16-20 May, 2010, ASCE, Providence, RI, United State, (4458-4467).
- Haestad, M., Walski, T.M., Barnard, T.E., Harold, E., Merritt, L.B., Walker, N. and Whitman, B.E. (2004). *Wastewater collection system modeling and design*. Haestad Press, Waterbury, Conn.
- Ji, H.W., Yoo, S.S., Kim, J. and Koo, D.D. (2018). The mechanical properties of high strength reinforced Cured-in-Place Pipe (CIPP) liner composites for urban water infrastructure rehabilitation, *Water*, 10(8), 1-12.

- Ji, H.W. and Yoo, S.S. (2018). The measures to reduce sewer odor in South Korea through sewer odor reduction system in Los Angeles and San Francisco, J. Korean Soc. Water Wastewater, 32(5), 445-451.
- K-water. (2019). LPCD, https://www.water.or.kr/statistic/resource/resource0202.do?seq=1717&p_group_seq=1040&menu_mode=4 (February 11, 2020).
- Lee, J.H., Park, Y.J., Kim, I.H., Nam, I.G., Kim, H.S. and Lee, J.K. (2008). *Engineering of water supply and sewerage*. Goomibook, 267-277.
- Ministry of Environment. (2016). *Statics of sewerage 2015*. 11-1480000-000159-10, 3-7.
- Ministry of Environment. (2017a). General description of sanitary sewer design, Korean design standard for sanitary sewer, <http://www.kcsc.re.kr/Search/ListCodes/102057#> (February 11, 2020).
- Ministry of Environment. (2017b). Design standard for conveyance facilities, Korean design standard for sanitary sewer, <http://www.kcsc.re.kr/Search/ListCodes/102057#> (February 11, 2020).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2020). Korea precipitation frequency data sever, <http://210.92.123.136/> (February 11, 2020).
- Regueiro-Picallo, M., Naves, J., Anta, J., Puertas, J. and Suárez, J. (2016). Experimental and numerical analysis of egg-shaped sewer pipes flow performance, *Water*, 8(12), 587.