

하수관거 임계조건

유 동훈* 이 정영**

1. 서론

하수관로시스템의 계획 및 설계에 있어서 가장 중요한 것 중의 하나가 토사 및 침전물의 퇴적을 방지하고 하수거의 침식을 방지하기 위한 최적 유속의 선택이다. 하수관거내를 유하하는 하수의 최저유속이란 하수 중에 포함된 유기성 부유물이 관거의 저부에 침전됨이 없이 지속될 수 있는 유속을 말하며 자체 청소유속을 일컫는다. 하수중의 오물이 차례로 관거에 침전되는 것을 막기 위하여 경사는 하류로 갈수록 감소되어도 유하함에 따라 유속이 점증되도록 해야 한다. 그러나 하류로 갈수록 하수량은 증가되어 관거가 커지므로 경사가 감소되어도 유속을 크게 할 수 있다. 또한 유속을 크게 형성하고자 경사를 급하게 만들면 매설깊이가 점차 깊게 되므로 시공이 곤란하고 공비가 증대된다. 하수관로는 유량변동이 있더라도 오물이 침전되지 않는 정도의 유속을 갖도록 해야 하는데 설계하수량에 대해 일반시방서에는 표 1에 제시된 바와 같이 최소유속이 0.6m/s가 되도록 추천하고 있다(한국수도협회, 하수도 시설기준, 1998). 우수관거 및 합류관거에서 우수관거보다 최소유속이 더 큰 이유는 토사류의 유입에 따른 침전물의 크기가 우수관거 보다 크기 때문이다. 그러나 관로의 최소유속이 유지되지 않으면 오물이 침전되고 관거내 유하시간이 길어져 관거내 침전물의 부패로 인한 황화물질 및 악취 등이 발생할 수 있다. 반면 유속이 지나치게 크면 관거를 손상시키고 유하시간 단축으로 인하여 하류지점에서 하수량을 크게 하는 요인이므로 최대유속을 3.0m/s로 제한하고 있다.

표 1. 하수도 시설기준에서 제시한 하수관거의 유속

하수관거	우수관거	합류관거 및 우수관거
최소유속	0.6 m/s	0.8 m/s
최대유속	3.0 m/s	3.0 m/s
이상적인 유속	1.0~1.8 m/s	

본 연구에서는 기존 하수관거의 개선책으로 유동훈과 강찬수(1998)의 지수형 상용관 마찰계수 산정식을 도입하고 토사세굴 임계속도도 지수형 산정식을 도입하여 관경과 관의 종류, 토사 입경에 따른 최적유속 산정식을 개발하고 관경, 토립자의 비중, 입경 등에 따라 관로경사를 결정하는 산정식을 개발하였다.

2. 최저유속

토사퇴적을 방지하기 위한 청소유속을 유지하려면 다음 조건을 만족해야 한다.

$$u_{*c} < u_* \quad \text{또는} \quad F_{*c} < F_* \quad (1)$$

여기서 F_{*c} 는 마찰후르드수, u_* 는 마찰속도, u_{*c} 는 임계마찰속도, F_{*c} 는 임계마찰후르드수이며 다음과 같다.

* 아주대학교 환경도시공학부 부교수

** 아주대학교 건설교통공학과 석사과정

$$\begin{aligned}
 F_* &= \sqrt{CF} \\
 u_* &= \sqrt{\frac{f}{8}} V \\
 F_{*c} &= \frac{u_{*c}}{\sqrt{(s-1)g\phi}}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

한편 최저유속 산정에 있어 토립자의 입경에 따라 N_ϕ 값을 정해 구간별로 산정식을 적용하며 입계마찰속도를 구하는 산정식을 지수형으로 다음과 같이 표기한다.

$$F_{*c} = a N_\phi^b \tag{3}$$

여기서 R-F Number 인 $N_\phi = \frac{\phi\sqrt{(s-1)g\phi}}{\nu}$ 이며, ν 는 점성계수, s 는 토사의 상대밀도, ϕ 는 토사입경, g 는 중력가속도이다. 하수관 설계에 있어 대개 $500 < N_\phi$ 이며, 이때 $a=0.1$, $b=0.11$ 이다.

식(2)와 식(3)를 식(1)에 대입하면 다음과 같다.

$$a N_\phi^b < \frac{W\bar{C}}{\sqrt{(s-1)g\phi}} \tag{4}$$

$f = \alpha R_D^\beta$ 로 가정하고 V 에 관해 정리하면 다음과 같다.

$$V = \left[\frac{8a^2}{\alpha} N_\phi^{2b} N_{D\phi}^{-\beta} \right]^{\frac{1}{2+\beta}} \sqrt{(s-1)g\phi} \tag{5}$$

여기서 $N_{D\phi} = \frac{R_D}{F_\phi} = \frac{DN\sqrt{(s-1)g\phi}}{\nu}$ 로 정의되며 $N_{D\phi}$ 는 조건치로서 바로 구해지는 무차원 수이다. 한편 유동훈과 강찬수(1998)의 지수형 마찰계수 산정식에서는 α 값을 관경의 함수로 유추하고 β 을 관의 종류와 관의 크기에 따라 고정하였으며 α 를 다음과 같이 산정하였다.

$$\alpha = \omega \left(\frac{D}{D_0} \right)^\zeta \tag{6}$$

여기서 ω 와 ζ 는 관의 크기와 관의 종류에 따라 변이하는 계수이며 D_0 는 기준관경으로서 1m이다. ω , ζ , β 의 수치는 표 2에 제시된 바와 같다.

표 2. α 산정식의 계수 ω 와 ζ 그리고 지수 β

관의 종류		ω	ζ	β
인발관	소형관	0.022	-0.803	-0.10
	중형관	0.065	-0.282	-0.08
역청 주철관	중형관	0.127	-0.255	-0.13
	대형관	0.098	-0.366	-0.08
연철관	소형관	0.126	-0.096	-0.15
	중형관	0.091	-0.135	-0.12

식(6)을 식(5)에 대입시켜 V 에 관하여 정리하면 다음과 같이 산정된다.

$$V = \left[\frac{8a^2}{\omega} N_\phi^{2b} N_{D\phi}^{-\beta} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-\xi} \right]^{\frac{1}{2+\beta}} \sqrt{(s-1)g\phi} \quad (7)$$

3. 관로경사와 관경

일반적으로 관로 설계에 있어서 기존의 경사 결정은 관경(mm)의 역수로 취하여 토립자의 비중과 크기를 고려하지 않은 상태로 오수관과 합류관 모두 일률적으로 결정하였기 때문에 과대 또는 과소 설계가 되어 비경제적일 수 있다. 따라서 본고에서는 관경, 토립자의 비중, 크기 등을 고려하여 최소경사와 관경을 산정하는 식을 유도하였다.

단면평균 마찰응력로부터 관로경사는 다음과 같이 나타난다.

$$u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} = \frac{1}{2} \sqrt{gDi} \quad (8)$$

식(8)를 식(2)에 대입하여 i 와 D 에 관하여 정리하면 자연관로의 경사는 관경과 토사입경이 주어질 경우 다음과 같이 표기된다. 또한 유량이 주어질 때는 식(7)로부터 식(11)과 같이 유도된다.

$$i = 4(s-1)a^2 N_\phi^{2b} \frac{\phi}{D} \quad (9)$$

$$D = 4(s-1)a^2 N_\phi^{2b} \frac{\phi}{i} \quad (10)$$

$$\frac{D}{D_0} = \left[\frac{\omega}{8a^2} N_\phi^{(-2b+\beta)} F_{0\phi}^{(2+\beta)} \left(\frac{\phi}{D_0}\right)^{-\beta} \right]^{\frac{1}{4+\beta-\xi}} \quad (11)$$

여기서 $F_{0\phi} = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} D_0^2 \sqrt{(s-1)g\phi}}$ 이며 D_0 는 기준관경으로서 마찬가지로 $D_0=1$ m 이다.

4. 비교·분석

하수관거 설계에는 표 3에 제시된 바와 같이 세가지 유형으로 구분되는데 설계유형 A는 자연관로의 경사를 결정하는 경우이며 설계유형 B는 최저유속을 산정하는 경우이고 설계유형 C는 관경을 결정하는 경우이다.

표 3. 하수관로의 설계유형별 산정식

설계 유형	산정 요구치	주어진 조건	산정식
A	i	D, s, ϕ, ν	$i = 4(s-1)a^2 N_\phi^{2b} \frac{\phi}{D}$
B	V	D, s, ϕ, ν	$V = \left[\frac{8a^2}{\omega} N_\phi^{2b} N_{D\phi}^{-\beta} \left(\frac{D}{D_0}\right)^{-\xi} \right]^{\frac{1}{2+\beta}} \sqrt{(s-1)g\phi}$
C	D	i, s, ϕ, ν	$D = 4(s-1)a^2 N_\phi^{2b} \frac{\phi}{i}$
		Q, s, ϕ, ν	$\frac{D}{D_0} = \left[\frac{\omega}{8a^2} N_\phi^{(-2b+\beta)} F_{0\phi}^{(2+\beta)} \left(\frac{\phi}{D_0}\right)^{-\beta} \right]^{\frac{1}{4+\beta-\xi}}$

본 연구에서 개발된 산정식과 기존의 경험식을 설계유형 A, B, C로 나누어 토사입경 ϕ 가 오수관일 때 2.5 mm와 합류관일 때 4 mm로 가정한 후 식(3)의 임계마찰후루두수 산정에 있어 $a=0.1$,

b=0.11를 사용하고 관종은 중형관인 주철관일 경우 $\omega=0.127$, $\zeta=-0.255$, $\beta=-0.13$ 를 사용해 간편식을 개발하였으며, 그 결과는 표 4에 제시된 바와 같다.

표 4. 하수관로의 설계유형별 간편식

설계유형	산정요구치	주어진 조건	산정식	
			오수관 ($\phi=2.5$ mm)	합류관 ($\phi=4$ mm)
A	i	D, s, ϕ, ν	$i = 0.648 \frac{1}{D}$	$i = 1.21 \frac{1}{D}$
B	V	D, s, ϕ, ν	$V = 0.707 D^{0.206}$	$V = 1.066 D^{0.206}$
C	D	i, s, ϕ, ν	$D = 0.648 \frac{1}{i}$	$D = 1.21 \frac{1}{i}$
		Q, s, ϕ, ν	$D = 1.261 Q^{0.453}$	$D = 1.084 Q^{0.453}$

단위: D(m), i(%), V(m/s), Q(m³/s)

설계유형 A의 자연관로의 경사결정에 있어 식(9)와 같이 관경, 토립자의 비중, 크기 등을 고려한 경우와 기존의 관경의 역수로서 경사를 결정한 값과 비교하여 표 5에 제시하였다. 설계유형 B의 최저유속을 산정하는데 있어 식(7)에서와 같이 관경에 따라 최저유속을 구하면 표 6에 제시된 바와 같다. 한편 Camp(1946)는 Manning식을 하수관로 흐름에 적용하여 최저유속 산정식을 개발하였는데 다음과 같다.

$$V = \frac{1}{n} \left(\frac{D}{4} \right)^{1/6} \sqrt{\xi(s-1)} \phi \quad (12)$$

여기서 n은 Manning 계수이나 Camp는 하수관인 경우 0.014로 고정하였으며, 상수 ξ 는 토사의 특성에 따라 0.03 - 0.06로 추천하였다. 또한 관경 D와 토사의 입경 ϕ 의 단위는 m 이고 유속 V의 단위는 m/s이다. 표 6에는 Camp식으로 추정된 최저유속도 제시되어 있는데 $\xi=0.05$ 로 가정하여 구한 결과 오수관의 경우는 본 연구에서 개발된식 보다 약간 증가하는 반면에 합류관은 거의 일치함을 볼 수 있다. 사실상 오수관의 경우는 직경 600mm 미만의 소구경 관거로서 표 6와 표 8에서 제시한 직경 600mm 이상의 값은 비교 차원에서 제시하였을 뿐 실적용의 의미는 없다.

표 5. 관경에 따른 관로경사

구분 관경 (mm)	Yoo식(9)에 의한 경사(%)		기존방식에 의한 경사(%) $D = \frac{1}{i}, D: m$
	오수관 ($\phi=2.5$ mm)	합류관 ($\phi=4$ mm)	
250	2.6	4.8	4.0
300	2.2	4.0	3.3
400	1.62	3.0	2.5
500	1.3	2.4	2.0
600	1.1	2.0	1.67
700		1.73	1.4
800		1.5	1.25
900		1.35	1.1
1000		1.2	1

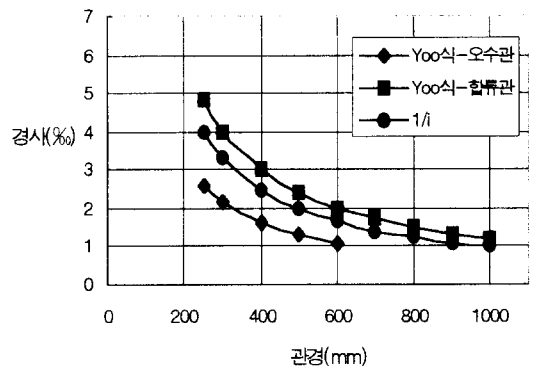


그림 2. 관경에 따른 관로경사의 산정분포

주) 단, 토립자의 비중: 2.65, 하수의 동점성계수: 10^{-6} m²/s,
중력 가속도(g)= 9.8 m/s²

표 6. 관경에 따른 최저유속 (최저유속 단위 : m/s)

구분 관경 (mm)	오수관 (D ≥ 250 mm), φ = 2.5 mm		합류관 (D ≥ 300 mm), φ = 4 mm	
	Yoo식(6)	Camp식(12)	Yoo식(6)	Camp식(12)
	250	0.573	0.646	
300	0.595	0.666	0.832	0.843
400	0.632	0.699	0.883	0.884
500	0.661	0.725	0.924	0.918
600	0.687	0.748	0.96	0.946
700	0.709	0.767	0.990	0.970
800	0.729	0.784	1.02	0.992
900			1.043	1.01
1000			1.066	1.03

주) 단, 토립자의 비중: 2.65, 하수의 동점성계수: 10^{-6} m²/s,
관중: 주철관, ξ = 0.05, n = 0.014, 중력 가속도(g) = 9.8 m/s²

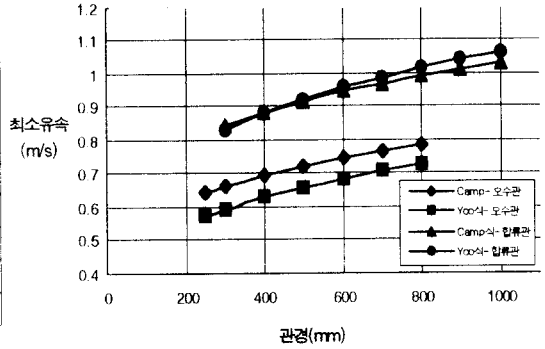


그림 3. 관경에 따른 유속의 산정분포

마지막으로 관경을 결정하는 설계유형 C는 식(9)를 D에 대하여 정리한 산정식 식(10)과 식(7)를 D에 대하여 정리한 산정식 식(11)이다. 한편 하수도 시설기준에 제시된 관경 결정방식은 경사만을 고려한 방식으로 다음과 같다.

$$D = \frac{1}{i} \quad (D : \text{m}, i : \%) \quad (13)$$

표 7에는 지형 경사가 주어졌을 경우 기존의 관경 결정방식인 식(13)과 식(10)을 통해서 오수관(φ = 2.5 mm)과 합류관(φ = 4 mm)에서의 관경 결정방식을 비교해 보았고 표 8에서는 유량이 주어졌을 때 식(11)을 통해 관경을 결정하였다.

표 7. 지형경사에 따른 관경

구분 경사(%)	Yoo식(10)에 의한 관경(mm)		기존방식에 의한 관경(mm) $D = \frac{1}{i}$ (i: 무차원)
	오수관 (φ = 2.5 mm)	합류관 (φ = 4 mm)	
1	648	1211	1000
1.5	432	808	666
2	324	606	500
2.5	259	485	400
3	216	404	333
3.5	185	346	285

주) 단, 토립자의 비중: 2.65, 하수의 동점성계수:
 10^{-6} m²/s, 중력 가속도(g) = 9.8 m/s²

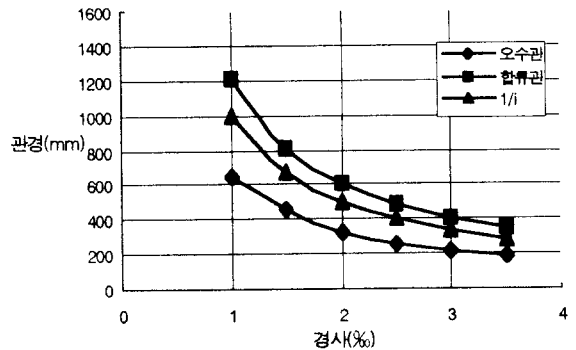


그림 4. 지형경사에 따른 관경의 산정분포

표 8. 유량에 따른 관경

구분 유량(m ³ /s)	Yoo식(11)에 의한 관경(mm)	
	오수관 ($\phi=2.5$ mm)	합류관 ($\phi=4$ mm)
0.1	445	382
0.2	609	523
0.3	732	629
0.4	834	716
0.5	922	793

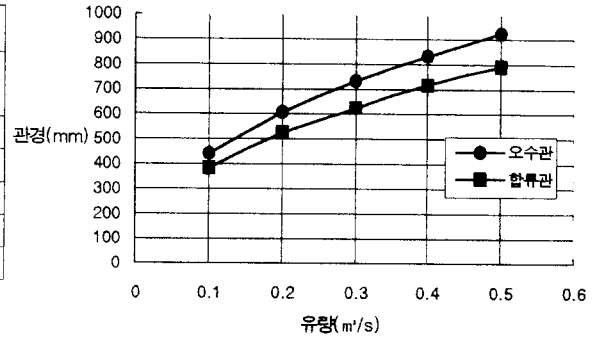


그림 5. 유량에 따른 관경의 산정분포

주) 단, 토립자의 비중: 2.65, 하수의 동점성계수:
 10^{-6} m²/s, 관종: 주철관, 중력 가속도(g)= 9.8 m/s²

5. 결론

본 연구에서는 하수관 설계시 설계유형을 세가지로 분류하여 이들 모든 경우에 대하여 양해법 산정식들을 개발하였다. 이상의 산정식들은 여러 종류의 하수관에 대한 상용관 마찰계수 산정식을 개발한 후 약간의 수정, 보완으로 실무설계에 직접 이용될 수 있을 것으로 기대한다. 또한 본 연구에서 도출된 기준식들을 하수관망 해석용 프로그램에 도입하여 하수관로 설계의 최적화에 일익을 더할 수 있을 것이다.

기존의 하수관 설계는 토사입경, 비중, 관종, 유량 등의 영향을 고려하지 않고 주로 관경만을 고려한 방식으로 관경에 따른 지형경사 및 지형경사에 따른 관경 결정에 있어 개발된 산정식과 표 5와 표 7에 제시된 바와 같이 오수관의 경우는 과대설계가 되고 합류관의 경우는 과소설계가 된다. 또한 최저유속 산정과 유량이 주어질 경우 관경산정에 있어 개발된 산정식을 적용하여 산정된 값과 기존의 하수도 설계기준(1998, 한국수도협회)에서 추천한 수치와 비교하여 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

비합리적인 하수관 설계로 인해 많은 도시의 하수관로에서 과다한 퇴적이 발생하여 우수시 우수장애는 물론 청천시 악취유발등이 발생하며 관경의 증가로 인해 공비가 증가된다. 또한 토사의 입경이 증가함에 따라 최저유속, 관로경사, 관경이 증가하는 반면에 유량이 주어졌을 경우는 관경이 작아짐을 알 수 있다. 이러한 문제점들은 최저유속, 관로경사, 관경 등의 결정에 있어 토립자의 입경, 비중, 관경, 관종, 유량 등을 종합적으로 고려한 합리적인 설계와 지역적인 여건의 고려로 해결될 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

유동훈 (1996). "소류사량 산정식." 한국해안·해양공학회지, 제8권 제1호, pp.52~60.
 유동훈 (1998). 유체역학 - 공학원리. 도서출판 새론.
 유동훈, 강찬수 (1998). "단일 상용관로의 간편설계." 한국수자원학회 논문집.
 유동훈, 김창식 (1995). "불규칙파에 의한 연안류." 한국해안·해양공학회지, 제7권, 제1호, pp.12~23.
 엽병대 (1998). "하수관거의 설계에 있어서 최저유속계획에 대한 고찰." 한국수자원학회지, 제46권 제5호, pp.36~43.
 환경부 한국수도협회 (1998). 하수도 시설기준.
 Camp, T.R., (1946). "Sedimentation and design of settling tanks." Trans., ASCE, Vol.111, pp. 895-936.
 Van Rijn, L.C., (1984). "Sediment transport." Part I (bedload transport), J.Hydraulic Eng., ASCE, Vol.110, HY10, pp.1431~1455.
 岩垣雄一 (1956). "限界掃流력에 관한 基礎的研究." 日本土木學會論文集, 제41호, pp.1~21.