

짧은 하수관에서의 마찰계수 추정

Friction Factor Evaluation of Short Length Sewerage Pipe

유 동 훈* · 이 태 희**
Dong Hoon Yoo* · Tae Hee Lee**

요 지

하수관은 평상시 개수로 흐름특성을 가지며, 설계강우를 초과하는 홍수사상이 발생하는 경우에만 만수되어 관로 흐름특성이 나타난다. 개수로 흐름은 Froude수에 의해 상류와 사류로 구분되며, 일반적으로 등류수로로 가정된 후 유출량 또는 수심 등 흐름 변위를 산정한다.

사류인 경우 하수관 출구부에서 등류수심이 발생한다고 가정하면 해석이 용이하지만 길이가 짧은 하수관에서 실험을 수행한 결과 등류조건을 조성하기가 용이하지 않았다. 따라서 등류수심이 발생한다는 가정 하에 개발된 기존 마찰계수 산정식의 보완이 필요하다. 완변이 부등류 해석법을 이용하여 부등류 마찰계수 산정식을 개발하고자 시도하였으며, 이를 등류 마찰계수 산정식의 결과와 비교하였다.

핵심용어 : 하수관 흐름, 상류, 사류, 출구부 수심, 등류수심, 마찰계수, 완변이 부등류 해석법

1. 서 론

하수관로를 설계하는데 있어 마찰계수의 산정은 가장 기본적이고도 중요한 항목이나 일반적으로 개수로 설계에서와 같이 등류수로에서 결정된 마찰계수 산정식을 그대로 이용하고 있는 실정이다. 그러나 홍수 초기와 후기에서의 흐름 조건은 가속흐름 또는 감속흐름이 발생하여 등류조건과는 상당한 수리특성 차이를 보일 수 있다. 또한 길이가 상대적으로 짧은 하수관로에서는 등류가 조성되기 어렵다. 따라서 가속흐름인지 감속흐름인지 흐름특성 차이를 분명히 파악한 후 마찰계수를 산정하여야만 하수관로 흐름 조건을 보다 정밀하게 파악하여 해석할 수 있다.

하수관로도 흔히 상용관로(상수관) 해석에 이용되는 Hazen-Williams식이나 개수로 해석에 이용되는 Manning식을 적용하여 해석하고 있다. 결과적으로 나타나는 두 산정식은 형태가 유사하나 그 원인은 분명히 다르다는 사실이 밝혀진 바 있다. Hazen-Williams식은 상용관 흐름에서 완난류와 전난류가 동시에 발생하는 복합류 흐름 특성 때문인 것으로 파악되고 있으며(유동훈과 원유승, 1995), Manning식은 동일한 조건의 개수로 흐름에 있어 벽면에서의 표면장력 영향 때문에 조고에 따라 완난류 곡선이 평행이동 하는 것으로 추론된 바 있다(유동훈과 이민호, 2000). 본 연구에서는 길이가 짧은 하수관로 개수로 흐름에서 강우 초기 또는 후기에 발생 가능성이 높은 가속흐름 또는 감속흐름에서의 마찰흐름 특성을 밝히고자 한다.

Nikuradse(1933)의 균일조도 원형관수로 실험결과로부터 관로 흐름은 층류, 천이층류, 완난류, 천이난류, 전난류 등 다섯 종류의 흐름특성을 가지고 있음을 확인하였다. 또한 Varwick(1945)의 실험결과로부터 개수로 흐름에서도 관로 흐름과 마찬가지로 다섯 종류의 흐름특성을 가지고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 아크릴관, 평균입경 2 mm, 4 mm인 모래를 직경 9 cm, 길이 550 cm~600 cm의 실험 수로인 아크릴 U형관에 부착하여 실험을 수행하였으며 관측된 결과로부터 아크릴 수로에서는 완난류 흐름이 확인되었으며 조고 2 mm와 4 mm

* 정회원·아주대학교 건설시스템공학과 교수·공학박사E-mail : dhyoo@ajou.ac.kr

** 아주대학교 건설시스템공학과 석사과정E-mail : rokmc828@nate.com

의 수로에서는 기존 실험에서 관측되지 않았던 전난류 흐름을 관측할 수 있었다.

또한, 하수관 맨홀 출구부에서 나타나는 단면 축소로 인한 hydraulic jump현상으로 파가 수로의 출구부까지 영향을 미치는 것을 알 수 있었고 조고에 따라 파의 주기가 달라지는 것도 확인할 수 있었다. 이러한 hydraulic jump현상으로 인한 파를 소거하기 위하여 관 입구부에 수직으로 배분장치를 설치함으로써 파 발생이 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

등류가 발생하지 않는 사류의 흐름특성을 해석하기 위하여 완변이 부등류 해석에 Runge-Kutta법을 적용하였지만 hydraulic jump현상으로 인한 파의 영향은 고려하는데 어려움이 있었다. 이 결과로부터 지수형 마찰계수 산정식의 비례상수 α 값을 추정하였고, 기존 등류조건에서 관측된 Varwick(1945)의 실험자료로부터 산정된 지수형 마찰계수 산정식의 비례상수 α 값과 비교하였다.

2. 수치해석

부등류에서의 마찰계수 산정식을 논하기에 앞서 정상등류에서의 마찰계수 산정식을 먼저 기술하고 부등류 해석에 관하여 논하기로 한다.

2.1 지수형 마찰계수 산정식

지수형 개수로 마찰계수 산정식은 조고에 따라 변이하는 계수 α 와 동수반경레이놀즈수 R_H 의 지수승 β 와 조고비 H_r 의 지수승인 ζ 의 함수로 다음과 같이 표현된다(유동훈과 이민호, 2000; 유동훈, 2003).

$$C = \alpha R_H^\beta H_r^\zeta \quad (1)$$

여기서 α 는 조고에 따라 변하는 비례상수이며, β 와 ζ 는 흐름특성 또는 각 변수의 크기에 따라 변이하는 지수이다. 지수형 산정식 각 계수의 수치는 표 1에 제시되어 있다. 조면이 아주 매끄러워 조고가 무시할 수 있을 정도로 아주 작은 경우 완난류 I구간의 비례상수 α 는 Blasius 산정식의 비례상수와 동일하다. ($\alpha = 0.028$)

표 1. 지수형 개수로 마찰계수 산정식의 제 계수

	흐름분류	경계조건	α	β	ζ
제형	층류	$R_H < 1,000$	-	-1.00	0
	완난류 I	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$0.028 + 0.0096k_w$	-0.25	0
	완난류 II	$40,000 \leq R_H < 2,000,000$	$(0.012 + 0.0048k_w)$	-0.17	0
	완난류 III	$2,000,000 \leq R_H < R_{H-ST}$	$(0.005 + 0.0018k_w)$	-0.11	0
	천이난류	$R_{H-ST} \leq R_H < R_{H-TR}$	$0.011 + 3.0 \times 10^{-5} H_r$	0.18	-0.80
	전난류	$R_{H-TR} \leq R_H$	$H_r < 23$	$(0.022 + 0.008k_w)$	0
$23 \leq H_r < 40$			$(0.0172 + 0.0019k_w)$	0	-0.41

제 관련식에 도입된 등가조고 $k_w = \phi$ (단위는 mm), $R_H = VH/\nu$, $H_r = H/k_w$ 이다.

사각형 : 자료부족으로 R_{r-ST} , R_{r-TR} 관계식을 추정하지 못했음

삼각형 : $R_{r-ST} = \text{Min}[-15 + 37k_w]H_r^{0.75}, 76 + 178k_w$ $R_{r-TR} = \text{Min}[130H_r^{0.75}, 1320]$

제형 : $R_{r-ST} = \text{Min}[(10 + 8.5k_w)H_r^{0.75}, 206 + 39k_w]$ $R_{r-TR} = \text{Min}[130H_r^{0.75}, 1320]$

완난류 경계조건 : $R_{H-ST} = R_{r-ST}H_r$

()에 기록된 산정식들은 관측자료 없이 관련식의 경향으로부터 추정된 관계식

2.2 완변이 부등류의 근사해법

완변이 부등류의 근사해법으로 Fourth-Order Runge-Kutta Method를 이용하였다. Runge-Kutta Method는 양해적 해석법으로서 정도가 높고 수심을 직접 산정할 수 있는 장점이 있다. 형태가 동일한 수로의 완변

이 부등류에 있어 수심변화율은 다음과 같다.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i_o - i + F_b^2 \frac{db}{dx}}{1 - F_h^2}$$

(2)

여기서 h 는 수심, i_o 는 수로기울기, i 는 에너지경사로서 $i = CF^2$, C 는 마찰계수, $F = V/\sqrt{gH}$, H 는 동수반경, $F_b = V/\sqrt{gb}$, b 는 수로폭, $F_h = V/\sqrt{gh}$ 이다. $db/dx = 0$ 로 가정한 후 수심을 직접 산정하기 위하여 Runge-Kutta법을 도입한다.

$$f(x, h) = \frac{dh}{dx} = \frac{i_o - i}{1 - F_h^2} \quad (3)$$

상기식에서 에너지경사를 산정할 때 부등류에서의 마찰계수를 추정하여야 되는데 식 (1)로 표기되는 정상류에서의 마찰계수 산정식과 동일한 형태이나 비례상수 α 만의 조정으로 부등류 흐름특성을 나타내고자 한다. Fourth-Order Runge-Kutta Method의 가중치는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} k_1 &= f(x_i, h_i) \\ k_2 &= f(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, h_i + \frac{1}{2}k_1\Delta x) \\ k_3 &= f(x_i + \frac{1}{2}\Delta x, h_i + \frac{1}{2}k_2\Delta x) \\ k_4 &= f(x_i + \Delta x, h_i + k_3\Delta x) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)의 가중치를 계산하고 계산된 가중치를 식 (5)에 대입하여 다음 단면에서의 수심을 직접 산정한다.

$$h_{i+1} = h_i + \frac{\Delta x}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \quad (5)$$

3. 실험 자료의 분석

직경 9 cm, 길이 550 cm~600 cm의 수로에 아크릴판, 평균입경 2 mm, 4 mm인 모래를 부착하여 세가지 조면을 형성하였고, 각 조도 조건마다 유량 0.0019, 0.0023, 0.0027, 0.0029, 0.0034 m³/s 등 다섯 가지 유량을 송출하였다. 각 유량마다 0.01428, 0.01642, 0.01857 등 3가지 경사로 변화시키면서 10 cm 간격으로 수심을 측정하였다.

대표적으로 아크릴 수로는 0.0034 m³/s의 유량에 0.01857의 경사, 2 mm 수로는 0.0034 m³/s의 유량에 0.01642의 경사, 4 mm 수로는 0.0023 m³/s의 유량에 0.01642의 경사에서 관측한 수심자료를 수치모형으로 추정된 수심자료와 비교한 결과가 그림 1에 도시되어 있다. 부등류 산정식(Runge-Kutta법)을 이용하여 그림 1에서와 같이 비례상수를 조정하여 관측된 수심과 비교하여 오차가 가장 작은 수심이 재현되도록 비례상수 α 를 추정하였다. Varwick(1945)의 자료로부터 도출된 산정식의 α 와 Runge-Kutta법을 적용한 부등류 해석을 통하여 해석한 결과로 추정된 비례상수 α 를 비교하여 표 2에 제시하였다.

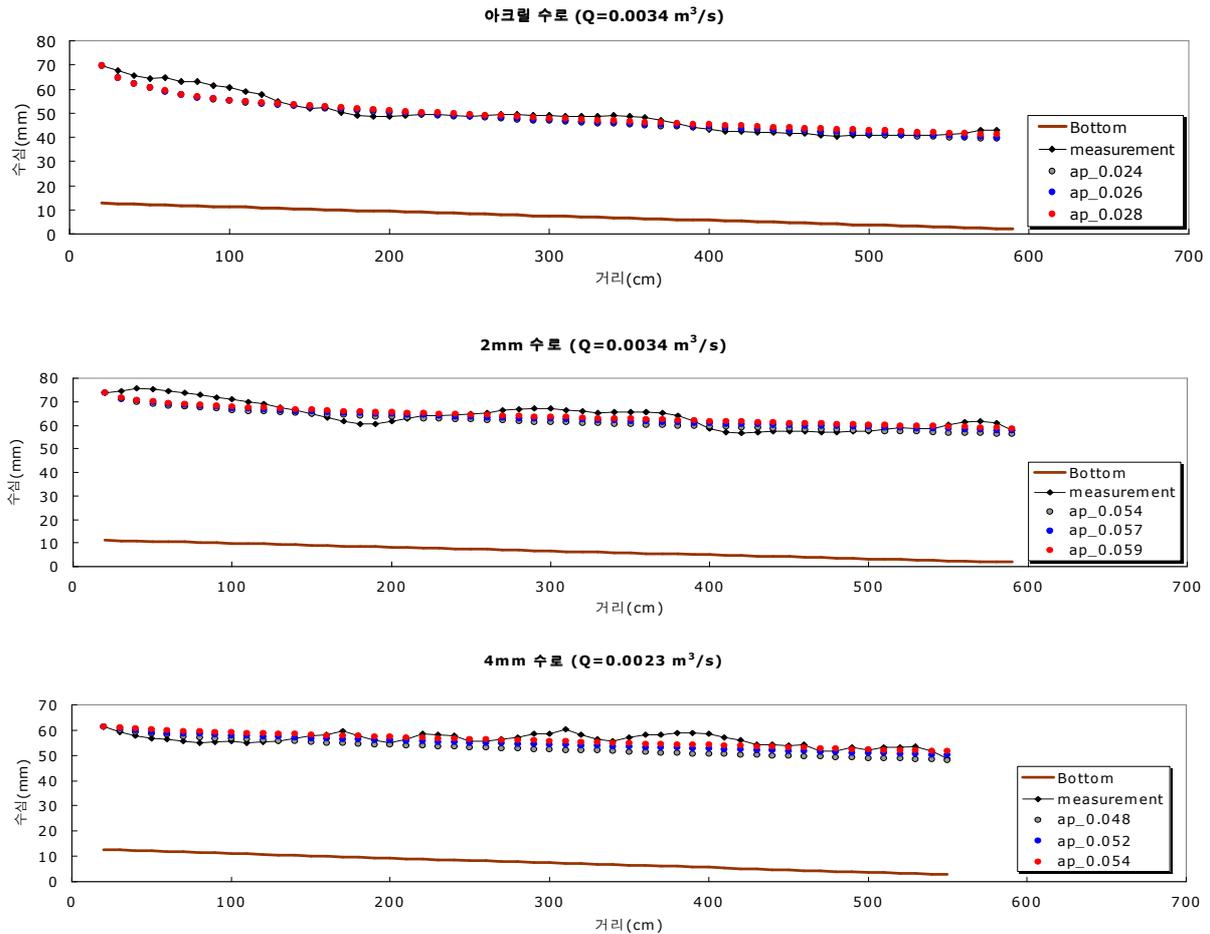
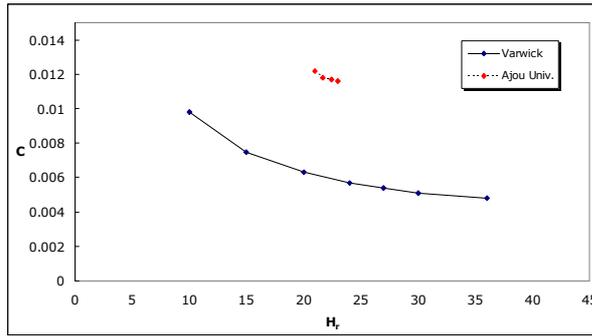


그림 1. 각 조고별 수로에서의 비레상수 α 추정

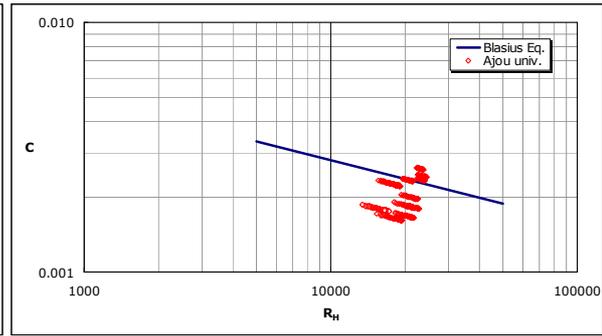
표 2. 비레상수 α 값의 비교

	흐름분류	경계 조건	α 산정식(등류수로)	α 추정치
아크릴 수로	완난류 1구간	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$0.028 + 0.0096k_w = 0.028$	0.02~0.028
2mm 수로	전난류 구간	$H_f < 23$	$0.022 + 0.008k_w = 0.038$	0.059
4mm 수로	전난류 구간	$H_f < 23$	$0.022 + 0.008k_w = 0.054$	0.054

아크릴판 그대로인 조면에서는 조고가 무시할 수 있을 정도로 작는데 이러한 조건에서는 $R_H=20,000$ 대의 완난류 흐름조건 $1,000 \leq R_H < 40,000$ 을 만족하는 완난류 1구간 흐름으로 그림 2의 (b)와 같이 가속흐름인 경우 마찰계수가 Blasius Eq. 산정치 보다 아래쪽으로 분포되어 대부분 등류수로인 경우의 추정치 0.028보다 작은 수치로 산정되었다. 한편 조고 2 mm와 조고 4 mm의 수로에서는 $H_f=13 \sim 23$ 의 범위에 있고 $R_H=35,000 \sim 65,000$ 의 범위에 있어 $R_H > 130H_f^{1.75}$ 의 전난류 조건을 만족하는 전난류가 발생하였다. 조고 2 mm의 수로에서는 등류수로 추정치 0.038과 비교하여 부등류 수로에서는 매우 큰 수치인 0.059로 추정되었다. 이는 그림 2의 (a)와 같이 감속흐름의 영향으로 Varwick(1945)의 2 mm자료로부터 산정된 등류수로의 조고비에 대한 마찰계수 분포에서 Varwick(1945)자료의 마찰계수 추정치 보다 상당히 증가(약 1.5배)하였다. 그림 1에 도시된 바와 같이 도수발생의 영향으로 부등류의 변이폭이 큰 것으로 파악되고 있으며 수심이 점점 증가하는 감속흐름특성이 마찰계수의 증폭에 상당히 기여한 것으로 파악되고 있다. 하지만 조고 4 mm의 수로에서는 등류수로 추정치 0.054와 동일하게 나타났다.



(a) 감속흐름(조고 2 mm)



(b) 가속흐름(아크릴판)

그림 2. 마찰계수의 분포 비교

4. 결 론

강우 초기나 강우 후기에는 부등류 흐름이 발생할 가능성이 높는데 특히 관로길이가 짧을 때 감속흐름 또는 가속흐름이 발생하게 된다. 이러한 흐름 조건에서는 등류흐름조건에서의 마찰흐름과 비교하여 상당히 작거나 상당히 큰 마찰력이 작용할 수 있다. 따라서 부등류 흐름 특성을 정확히 해석하여야 하수관로 해석을 보다 적절하게 수행할 수 있으리라 판단된다. 도수발생의 영향으로 부등류의 변이폭이 큰 것으로 파악되었으며 수심이 점점 증가하는 감속흐름특성이 마찰계수의 증폭에 상당히 기여한 것으로 파악되었다. 이러한 감속흐름에서 조고 2 mm수로의 결과와 같이 마찰계수 추정치가 등류수로에서의 추정치보다 크게는 2배 가까이 증가하고 가속흐름에서는 아크릴판 수로의 결과와 같이 마찰계수 추정치가 등류수로에서의 추정치보다 감소하는 것을 실험결과로부터 정성적으로 파악할 수 있었다. 하지만 조고 4 mm 수로의 경우 감속흐름의 영향을 받지만 마찰계수 추정치가 등류수로에서의 추정치와 동일하게 나타나는 것은 어떠한 영향으로 인한 것인지 해석하지 못하였다. 앞으로 보다 많은 수리조건에 대한 실험을 수행하여 정량적인 추정이 가능한 산정식을 개발할 예정이다.

감 사 의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03-산학연C03-01)에 의한 도시홍수재해관리기술연구사업단의 연구성과입니다.

참 고 문 헌

1. 유동훈, 원유승(1995). "상용관 마찰계수." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제16권, 제II-1호, pp.1-12.
2. 유동훈, 이민호(2000). "지수형 개수로 마찰계수 산정식." 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권, 제 1-B호, pp.1-10.
3. 유동훈(2003). 최신수리학. 새론출판사.
4. Nikuradse, (1933). "Stroemungsgesetze in rauhen Rohren." Ver. Dtsch Ing. Forsch, No. 361.
5. Varwick, F.(1945). Zur Fliess fromel fur offene Kunstliche. These inedite, Dresden University.