

# 하수관 등류수심 양해법 산정식

## Explicit Equations of Normal Depth for Drainage Pipes

유 동 훈\* / 노 정 수\*\*  
Yoo, Dong Hoon / Rho, Jung Soo

### Abstract

The computation of normal depth is very important for the design of channel and the analysis of water flow. Drainage pipe generally has the shape of curvature like circular or U-type, which is different from artificial triangular or rectangular channel. In this case, the computation of normal depth or the derivation of equations is very difficult because the change of hydraulic radius and area versus depth is not simple. If the ratio of the area to the diameter, or the hydraulic radius to the diameter of pipe is expressed as the water depth to the diameter of pipe by power law, however, the process of computing normal depth becomes relatively simple, and explicit equations can be obtained. In the present study, developed are the explicit normal depth equations for circular and U-type pipes, and the normal depth equation associated with Hagen (Manning) equation and friction factor equation of smooth turbulent flow by power law is also proposed because of its wide usage in engineering design.

**keywords** : normal depth, drainage pipe, circular pipe, U-type pipe, power law, explicit equations

### 요 지

등류수심의 산정은 수로 설계 및 흐름 해석에 있어 매우 중요하다. 하수관은 삼각형 또는 사각형의 인공 개수로와 달리 원형, U형과 같이 곡률을 갖는 경우가 일반적이며, 이 경우 수심에 따른 통수단면적 및 동수반경의 변화가 일정하지 않으므로 등류수심 산정 또는 수식 유도에 있어 상당한 어려움을 갖는다. 그러나 단면적과 관경의 비 또는 동수반경과 관경의 비를 수심대 관경의 비로 표기하여 지수형으로 나타내면 수식의 전개과정이 매우 용이해지며, 양해법 산정식의 개발이 가능해진다. 따라서 본 고에서는 우선 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 원형 개수로와 U형 개수로에 대한 등류수심 양해법 산정식을 제시하며, 완난류 지수형 마찰계수 산정식과 더불어 실무에서 주로 사용되는 Hagen (Manning) 산정식을 이용한 등류수심 산정식도 제시하였다.

**핵심용어** : 하수관, 등류수심, 원형관, U형관, 지수형 산정식, 양해법 산정식

### 1. 서 론

입계수심은 수류 흐름조건을 판별하는 주요 수치이며 이에 대한 양해법 산정식을 유동훈 등(2004)가 발표

한 바 있다. 한편 등류수심의 산정은 수로 설계에 있어 주요 관건이 된다. 관로내 흐름이라 할지라도 하수관기에서와 같이 만수되지 않으면 개수로 흐름이 되기 때문에 원형관의 등류수심을 구하기 위해서는 개수로 단

\* 정회원 · 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

Division of Environmental and Urban Engrg. Ajou Univ., San 5 Wonchun-Dong Paldal-Gu Suwon, Korea 443-749  
(e-mail: dhyoo@ajou.ac.kr)

\*\* 아주대학교 대학원 건설교통공학과 석사과정수료, 현재 동부엔지니어링 수자원환경부

면의 기하학적인 해석이 필요하다(유동훈, 2003, 유동훈 외, 2001). 하수관의 단면형은 원형, 반원형, 계란형, 마제형 등이 있으나 우선 실무에서 가장 많이 사용하고 있는 원형 개수로와 U형 개수로에 대한 등류수심 산정식을 제시한다.

원형관 개수로 등류수심 산정식을 개발할 경우 기존의 마찰계수 산정식은 상당한 반복과정이 요구된다. 등류수심 산정식을 양해법으로 개발하기 위해서 개수로 마찰흐름 특성을 충분히 반영하면서도 형식이 단순한 지수형 마찰계수 산정식을 도입하였다. 한편 지수형 마찰계수 산정식은 원형관 및 U형 개수로에 대해서는 개발되어 있지 않기 때문에 이와 유사한 제형 개수로 마찰계수 산정식을 이용한다.

## 2. 지수형 산정식

하수관거의 흐름은 일반적으로 개수로 형태이며, 마찰계수 또는 평균유속 산정법으로 전난류 형태의 Hagen (Manning)식을 주로 사용하여 왔지만 완난류 흐름일 가능성이 매우 높다. Bray (1979)는 하저에 주로 자갈이 퇴적되어 있는 산지 소하천의 평균유속을 선정할 때 조고비만의 함수인 전난류 산정식보다 레이놀즈수와 조고비의 조합형이 약간 더 우수한 산정결과를 보이고 있음을 확인하였으며, 완난류의 대표적인 특성

인 레이놀즈수의 함수로 취하더라도 조고비만의 함수로 취한 회귀선 못지않게 우수한 회귀선을 도출할 수 있었다. Noori (1984)는 급경사면의 하천수로를 해석할 때 레이놀즈수만의 함수인 완난류 산정식으로도 아주 양호한 산정결과를 보여주었다. 이러한 연구결과들이 일반 개수로 흐름에서도 완난류가 발생할 가능성을 시사하고 있는데, 규격이 작은 하수관에서는 레이놀즈수가 상대적으로 작기 때문에 완난류가 발생할 가능성이 높다.

한편 유동훈(2003)은 Hicks and Mason (1998)의 흐름자료를 이용하여 지수형 완난류 마찰계수 산정식을 개발하였다. 지수형 개수로 마찰계수 산정식은 등류수심의 산정 등 개수로 설계에 유용한 마찰계수 산정식이다. 조고에 따라 변이하는 계수  $\alpha$ 와 동수반경레이놀즈수  $R_H$ 의 지수승  $\beta$ 의 함수로 다음과 같이 표현된다(유동훈 외, 2000).

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

여기서  $\alpha$ 는 조고에 따라 변하는 계수이며,  $\beta$ 는 흐름특성 또는 각 변수의 크기에 따라 변이하는 계수이다. 지수형 산정식 각 계수의 수치는 표 1에 제시되어 있다. 표 1에 제시된 지수형 산정식의  $\alpha$ 는 등가조고에 선형비례하는 것으로 추정되었는데 이때 등가조고는 벽면에 부착된

표 1. 지수형 개수로 마찰계수 산정식의 제 계수

	흐름분류	$R_H$	$\alpha$	$\beta$
사각형	층류	$R_H < 1,000$	$1.65 + 4.125k_w$	-1.00
	완난류 I	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$(0.025 + 0.009k_w)$	-0.25
	완난류 II	$40,000 \leq R_H < 1,000,000$	$0.010 + 0.0033k_w$	-0.17
	완난류 III	$1,000,000 \leq R_H < R_{H-ST}$	$(0.0045 + 0.0013k_w)$	-0.11
삼각형	층류	$R_H < 1,000$	-	-1.00
	완난류 I	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$0.027 + 0.0109k_w$	-0.25
	완난류 II	$40,000 \leq R_H < 1,000,000$	$(0.011 + 0.0048k_w)$	-0.17
	완난류 III	$1,000,000 \leq R_H < R_{H-ST}$	$(0.0047 + 0.0022k_w)$	-0.11
제형	층류	$R_H < 1,000$	-	-1.00
	완난류 I	$1,000 \leq R_H < 40,000$	$0.028 + 0.0048k_w$	-0.25
	완난류 II	$40,000 \leq R_H < 1,000,000$	$(0.012 + 0.0022k_w)$	-0.17
	완난류 III	$1,000,000 \leq R_H < R_{H-ST}$	$(0.005 + 0.0009k_w)$	-0.11

제 관련식에 도입된 등가조고  $k_w$ 의 단위는 mm

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

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

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 :  $R_{H-ST} = R_{r-ST} \cdot H_r$

( )에 기록된 산정식들은 관측자료 없이 관련식의 경향으로부터 추정된 관계식

토사 평균입경의 2배로 간주하였다. 이는 Colebrook and White (1937)의 실험결과로서 확인된 사실로서 노출된 벽면에 모래를 몰다르로 부착할 경우 밀폐된 관내에 적착제로 부착한 Nikuradse (1933)의 조면상태와 비교하여 거의 2배의 조고로 추정되었기 때문이다.

표 1에 제시된 바와 같이 제형 개수로인 경우 비례상수  $\alpha$ 는 증가조고가 매우 작을 경우 원형관의  $\alpha$ 와 유사하다. 실제로 최근의 실험연구(유동훈 외, 2004)에 의하여 원형 수로나 U형 수로도 제형 수로와 유사한  $\alpha$ 수치를 갖는 것으로 확인되었다. 한편 증가조고가 작을 경우 사각형 수로나 삼각형 수로의  $\alpha$ 는 원형관의  $\alpha$ 보다 작으나, 조고에 따른 변이 폭이 커서 조고가 클 경우  $\alpha$ 가 훨씬 커진다. 즉 사각형 수로나 삼각형 수로는 상대적으로 조고에 따라 마찰계수가 매우 커짐을 알 수 있다.

### 3. 기하학적 수로 단면 해석

만수가 되지 않은 하수관은 개수로 흐름이기 때문에 수심의 증감에 따라 통수단면적 및 동수반경도 변화하게 된다. 특히 하수관은 제형 또는 사각형의 인공 개수로와 달리 원형, U형과 같이 곡률을 갖는 경우가 일반적이며, 이 경우 수심에 따른 단면적 및 동수반경의 변화가 일정하지 않으므로 수식 유도에 있어 상당한 어려움을 갖는다. 그러나 단면적과 관경의 비 또는 동수반경과 관경의 비를 수심대 관경의 비로 표기하여 지수형으로 나타내면 수식의 전개과정이 매우 용이해지며, 양해법 산정식의 개발이 가능해진다.

#### 3.1 원형단면 해석

직경 D인 원형단면 수로내에 수심 h로 물이 흐를 때 수면과 단면의 중심이 이루는 각을  $\theta$ (단위: radian)라 하면(그림 1 참조), 단면적 A, 윤변 P, 동수반경 H는 다

음과 같이 계산된다.

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

$$P = r \cdot \theta \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 이용해 동수반경(H)을 구하고, 수면과 단면의 중심이 이루는 각  $\theta$ 를 수심 (h)에 대해 표현하면 다음과 같다.

$$H = \frac{A}{P} = \frac{r}{2} \left(1 - \frac{\sin \theta}{\theta}\right) \quad (4)$$

$$\theta = 2 \cos^{-1} \left(1 - 2 \frac{h}{D}\right) \quad (5)$$

식 (2)와 식 (4)를 이용하여 수심 대 관경(h/D)에 대한 형상비 관계수치를 표 2에 제시하였다.

원형관 개수로 등류수심을 양해법으로 산정하는 식을 유도하기 위해서는 동수반경(H)과 관경(D)의 비를 수심(h)과 관경(D)에 대한 지수형 함수로 표기할 필요가 있다. 즉,

$$\frac{H}{D} = \zeta \left(\frac{h}{D}\right)^n \quad (6)$$

또한, 면적(A)와 관경제곱(D<sup>2</sup>)의 비를 수심(h)과 관경(D)에 대한 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{A}{D^2} = a \left(\frac{h}{D}\right)^b \quad (7)$$

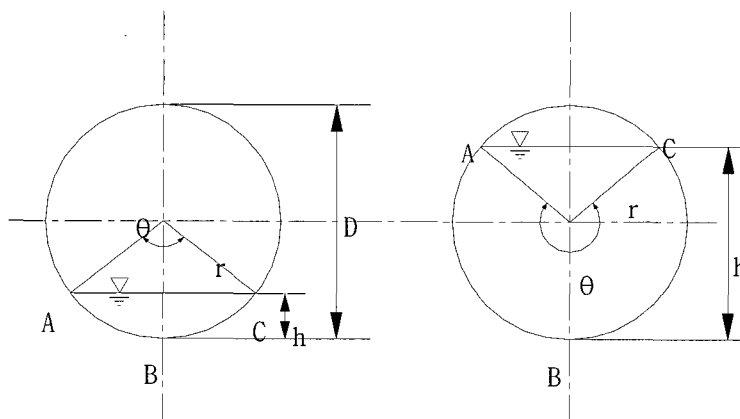


그림 1. 원형관 단면도

표 2. 원형단면 형상비 관계수치

h/D	A/D <sup>2</sup>	H/D	h/D	A/D <sup>2</sup>	H/D
0.05	0.015	0.033	0.55	0.443	0.265
0.10	0.041	0.064	0.60	0.492	0.278
0.15	0.074	0.093	0.65	0.540	0.288
0.20	0.112	0.121	0.70	0.587	0.296
0.25	0.154	0.147	0.75	0.632	0.302
0.30	0.198	0.171	0.80	0.673	0.304
0.35	0.245	0.193	0.85	0.712	0.303
0.40	0.293	0.214	0.90	0.745	0.298
0.45	0.343	0.233	0.95	0.771	0.286
0.50	0.393	0.250	1.0	0.784	0.250

표 3. 원형 단면 형상비 지수형 관계식의 제상수

구간	h/D	a	b	ξ	η
I	0.00 ~ 0.30	1.15	1.45	0.53	0.93
II	0.30 ~ 0.60	0.97	1.31	0.40	0.70
III	0.60 ~ 1.00	0.81	0.93	0.278	0

여기서 식 (6)과 식 (7)에서의 상수 a, b, ξ, η는 기하학적인 특성으로부터 구할 수 있다.

표 2에 제시된 수치를 이용하여 수심(h) 대 동수반경(H)에 대한 수치를 세 구간으로 구별하여 상수 a, b, ξ, η의 수치를 표 3에 제시하였다. 그림 2는 식 (7)에 표 3에서 제시된 a와 b를 적용했을 때 정밀값과 지수형 관계식의 비교 결과이며, 그림 3은 식 (6)에 ξ, η를 적용했을 때의 비교 결과이다.

형상비 구간 III에서 ξ와 η의 수치가 크게 변하는 이유는 그림 3에 도시한 바와 같이 원형관에서 어느 한 계를 지나면 수심이 증가함에 따라 동수반경이 감소하기 때문이다. 그러나 기하학적으로 물이 관에 꽂 차서 흐르는 순간 단면적의 증가에 대한 윤변의 증가폭이 훨씬 커져 동수반경이 감소한다. 이러한 불연속 구간에서는 수치적으로 해를 구할 수 없어 η를 0으로 설정하여 동수반경이 일정해 지도록 고정했다. 이러한 가정은

0.65 < h/D < 0.95 구간에서 동수반경을 약간 과소 산정하며, h/D > 0.95 구간에서는 약간 과대 산정하는 경향을 보이지만 오차가 과도하게 크지는 않다.

### 3.2 U형단면 해석

U형 수로는 반원수로를 기준으로 수심 h가 반지름 r보다 작을 때는 원형 단면해석과 동일하고, 수심이 반지름보다 클 때는 반원의 면적에 직사각형의 면적을 합하면 된다. 따라서 전자의 경우는 생략하며, 후자의 경우 단면적 A, 윤변 P, 동수반경 H는 다음과 같이 계산된다.

$$A = \frac{\pi r^2}{2} + 2r(h-r) \quad (h > r) \quad (8)$$

$$P = \pi r + 2(h-r) \quad (h > r) \quad (9)$$

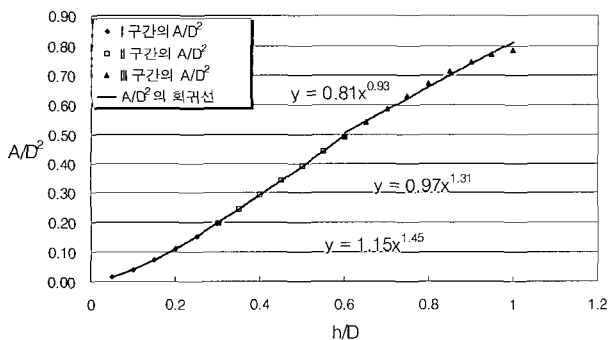


그림 2. h/D에 대한 A/D<sup>2</sup>의 변이

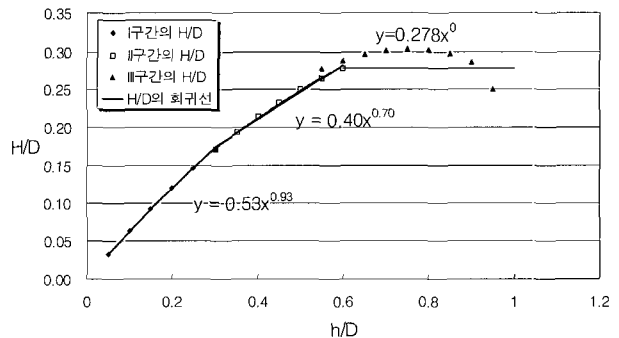


그림 3. h/D에 대한 H/D의 변이

식 (8)과 식 (9)를 이용해 동수반경(H)을 구하고, 원형 관 수로와 마찬가지로 수심 대 관경(h/D)에 대한 형상비 관계수치를 나타내면 표 4와 같다.

U형 수로의 개수로 등류수심을 양해법으로 산정하는 식을 유도하기 위해서는 원형수로와 마찬가지로 동수반경(H)과 관경(D)의 비를 수심(h)과 관경(D)에 대한 지수형 함수로 표기할 필요가 있으며, 이는 식 (6), (7)과 동일하다.

그림 4와 5로부터 추정된 관련 상수 a, b,  $\xi$ ,  $\eta$ 는 표 5에 제시하였다.

#### 4. 완난류 원형 및 U형 개수로 등류수심 산정식

Chezy식을 마찰계수에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$C = \frac{A^{2/3} g H}{Q^2} \quad (10)$$

통합지수 마찰계수 산정식 (1)과 식 (6), 식 (7)을 식 (8)에 대입하여 원형 또는 U형 수로의 등류수심에 관한 양해법 수식을 유도하면 다음과 같다.

$$S = \gamma T^\delta \quad (11)$$

여기서,  $S = \frac{\nu h}{Q}$ ,  $T = \frac{1}{v} (Q^3 g i)^{\frac{1}{5}}$ ,  $\gamma = a_\xi \alpha^{\frac{1}{\lambda}} S_D^{\frac{\sigma}{\lambda}}$ ,

$$\delta = -\frac{5}{\lambda}, a_\xi = (a^{2+\beta} \xi^{1-\beta})^{-\frac{1}{\lambda}}, S_D = \frac{\nu D}{Q},$$

$$\sigma = -5 + (\eta + 2b) - \beta(1 + \eta - b),$$

$$\lambda = (\eta + 2b) - \beta(\eta - b)$$

표 4. U형 단면 형상비 관계수치

h/D	A/D <sup>2</sup>	H/D	h/D	A/D <sup>2</sup>	H/D
0.05	0.015	0.033	0.65	0.543	0.288
0.10	0.049	0.064	0.70	0.593	0.296
0.15	0.074	0.093	0.75	0.643	0.302
0.20	0.112	0.121	0.80	0.693	0.304
0.25	0.154	0.147	0.85	0.743	0.303
0.30	0.198	0.171	0.90	0.793	0.298
0.35	0.245	0.193	0.95	0.843	0.286
0.40	0.293	0.214	1.00	0.893	0.250
0.45	0.343	0.233	1.05	0.943	0.353
0.50	0.393	0.250	1.10	0.993	0.358
0.55	0.443	0.265	1.15	1.043	0.363
0.60	0.493	0.278	1.20	1.093	0.368

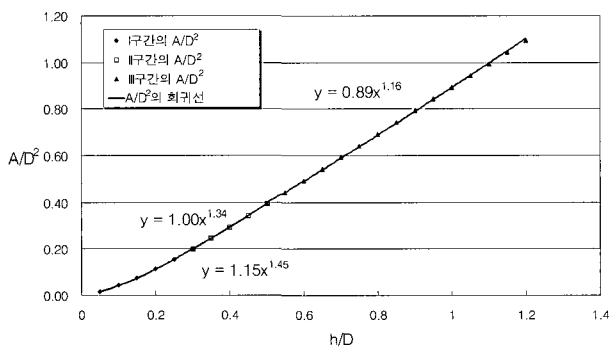


그림 4. h/D에 대한 A/D<sup>2</sup>의 변이

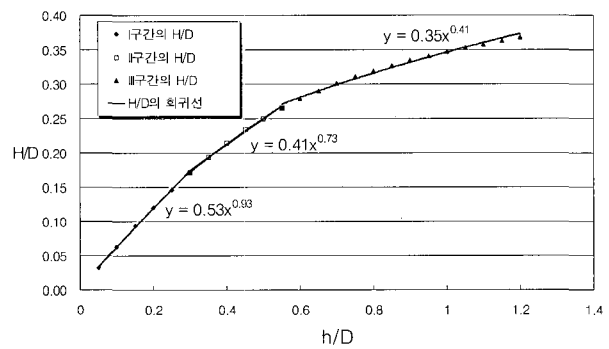


그림 5. h/D에 대한 H/D의 변이

표 5. U형 단면 형상비 지수형 관계식의 제상수

구간	h/D	a	b	$\xi$	$\eta$
I	0.00 ~ 0.30	1.15	1.45	0.53	0.93
II	0.30 ~ 0.55	1.00	1.34	0.41	0.73
III	0.55 ~ 1.20	0.89	1.16	0.35	0.41

표 6. 경계식의 계수

수로형태	h/D(t)	$A_c$	흐름구간에 따른 $A_c$	
원형	0.3	$1.15^{2+\beta} 0.53^{1-\beta} 0.3^q$	완난류 I	0.0067
			완난류 II	0.0068
			완난류 III	0.0069
	0.6	$0.81^{2+\beta} 0.278^{1-\beta} 0.6^q$	완난류 I	0.0277
			완난류 II	0.0294
			완난류 III	0.0308
U형	0.55	$0.89^{2+\beta} 0.35^{1-\beta} 0.55^q$	완난류 I	0.0480
			완난류 II	0.0499
			완난류 III	0.0514

표 7. 원형 하수관의 흐름구간 결정

	유량이 적을 때	유량이 많을 때
소형관	완난류 I	완난류 II
중형관	완난류 II	완난류 III
대형관	완난류 III	완난류 IV

식 (11)의 우변은 모두 기지항이고, 좌변의 무차원수 S에서  $\nu$ 와 Q는 기지값이므로 등류수심 h를 바로 산정할 수 있다.

식 (11)을 이용하여 등류수심을 산정할 경우 표 3 또는 표 5로부터 상수 a, b,  $\xi$ ,  $\eta$ 를 구하기 위하여 형상비(h/D) 구간을 결정해야 되는데, 이는 각 연결점에서의 유량 Q를 미리 구하여 주어진 유량과 비교하여 결정할 수 있다. 연속방정식에 식 (6)과 식 (7)을 대입하여 수심비가 0.3, 0.6인 경우 무차원수  $F_T$ 와  $G_D$ 를 도입하여 구간 경계에서의 유량 산정식을 유도하면 다음과 같다.

$$F_{T-c} = (\alpha^{-1} A_c \text{ i } G_D^\beta)^{\frac{1}{2+\beta}} \quad (12)$$

여기서,  $F_{T-c} = \frac{Q_c}{D^2 \sqrt{gD}}$ ,  $G_D = \frac{\nu}{D \sqrt{gD}}$ ,

$$A_c = a^{2+\beta} \xi^{1-\beta} t^q, \quad t = \frac{h}{D},$$

$$q = 2b + \eta(1 - \beta) + b\beta$$

$Q_c$ 는 h/D=0.3 또는 0.6이 되는 조건에서의 유량이다.

$\alpha$ 와  $\beta$ 는 마찰계수 산정식 (1)에 도입되는 계수이며 상수  $A_c$ 는 기하학적 형상계수이다.  $G_D$ 와  $A_c$ 를 산정한 후  $F_T$ 와 유량과의 관계를 이용하여 단면경계에서의 유량  $Q_c$ 를 구할 수 있다. 이를 위해 표 6에 경계식의

주요 계수  $A_c$ 를 일반형과 흐름구간별 값으로 제시하였다. 식 (12)의 아래첨자 c는 구간 경계를 지칭한다.

$\alpha$ 와  $\beta$ 는 표 1로부터 구해야 하나, 흐름조건을 알 수 없으므로 일단 흐름조건을 가정하여 등류수심을 구하고 이를 검증하여 결정해야 된다. 그러나 원형 하수관의 흐름은 대부분 완난류 I~IV구간에 속할 것으로 추정되며 표 7과 같이 가정할 것을 추천한다.

독자의 이해를 돕기 위하여 간단한 예제를 제시하고 상세한 해석을 기술하였다.

**【예제】**

- a) 관경 2m, 유량 0.6m<sup>3</sup>/s, 수로경사는 0.002일 때 원형관 개수로의 등류수심을 산정하라.
  - b) 같은 조건에서 유량이 3.0m<sup>3</sup>/s일 경우 원형관 개수로의 등류수심을 산정하라.
- (단, 등가조교( $k_w$ )는 0.2mm).

**【풀이】**

- a) 위 조건의 흐름을 완난류II구간, 제형수로 조건과 동일하다고 가정하면 표 1에 의해  $\alpha = 0.0022k_w + 0.012 = 0.01244$ ,  $\beta = -0.17$ ,  $\zeta = 0$ 이다.

형상비 h/D=0.3인 경우 유량을 산정하면

$$G_D = \frac{\nu}{D \sqrt{gD}} = 1.12 \times 10^{-7}$$

표 6에 의해  $A_c = 0.0068$

$$F_{T-0.3} = (\alpha^{-1} A_C \text{ i } G_D^\beta)^{\frac{1}{2+\beta}} =$$

$$[0.01288^{-1} \times 0.0068 \times 0.002 \times (1.12 \times 10^{-7})^{-0.17}]^{\frac{1}{2-0.1}}$$

$$= 0.1045$$

$$Q_{0.3} = F_{T-0.3} D^2 \sqrt{gD} = 1.85 \text{ m}^3/\text{s}$$

주어진 유량  $Q = 0.6 \text{ m}^3/\text{sec} < Q_{0.3} = 1.85 \text{ m}^3/\text{sec}$  이

므로 흐름조건을  $0 < \frac{h}{D} < 0.3$  이라고 가정하면 표 3

에 의해

$$a=1.15, b=1.45, \xi=0.53, \eta=0.93$$

$$\sigma = -5 + (\eta + 2b) - \beta(1 + \eta - b) = -1.0884$$

$$\lambda = (\eta + 2b) - \beta(\eta - b) = 3.7416$$

$$a_\xi = (a^{2+\beta} \xi^{1-\beta})^{-\frac{1}{\lambda}} = 1.139$$

$$S_D = \frac{D\nu}{Q} = 3.3333 \times 10^{-6}$$

$$\gamma = a_\xi \alpha^{\frac{1}{\lambda}} S_D^{\frac{\sigma}{\lambda}} = 13.95$$

$$\delta = -\frac{5}{\lambda} = -1.336$$

$$T = \frac{1}{\nu} (Q_{gi})^{\frac{1}{5}} = 335297.7$$

$$S = \gamma T^\delta = 5.7656 \times 10^{-7}$$

따라서 구하고자 하는 등류수심은 다음과 같다.

$$h = \frac{SQ}{\nu} = 0.35 \text{ m}$$

가정한 조건이 맞는지 검증하면,

$$\theta = 2\cos^{-1}(1 - 2\frac{h}{D}) = 1.716 \text{ rad}$$

$$A = \frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta) = 0.3632 \text{ m}^2,$$

$$H = \frac{A}{P} = \frac{r}{2}(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}) = 0.2117 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = 1.652 \text{ m/sec}$$

$$R_H = \frac{VH}{\nu} = 349,725 \text{ (완난류 2구간)}$$

형상구간  $\frac{h}{D} = 0.17$  이다.

흐름조건이 완난류 2구간이고,  $\frac{h}{D}$  가 I구간이므로 가

정한 조건이 모두 성립한다.

따라서 구하고자 하는 등류수심은 0.35m 이다.

b) 흐름을 완난류 II구간, 제형수로의 조건과 동일하

다고 가정하면 표 1에 의해

$$\alpha = 0.0022k_w + 0.012 = 0.01244,$$

$$\beta = -0.17, \zeta = 0 \text{ 이다.}$$

형상비  $h/D=0.6$ 인 경우 유량을 산정하면

$$G_D = \frac{\nu}{D\sqrt{gD}} = 1.12 \times 10^{-7}$$

표 6에 의해  $A_C = 0.0308$

$$F_{T-0.6} = (\alpha^{-1} A_C \text{ i } G_D^\beta)^{\frac{1}{2+\beta}} =$$

$$[0.01244^{-1} \times 0.00294 \times 0.002 \times (1.12 \times 10^{-7})^{-0.17}]^{\frac{1}{2-0.1}}$$

$$= 0.0674$$

$$Q_{0.6} = F_{T-0.6} D^2 \sqrt{gD} = 1.194 \text{ m}^3/\text{s}$$

주어진 유량  $Q = 3 \text{ m}^3/\text{sec} > Q_{0.6} = 1.194 \text{ m}^3/\text{sec}$  이므

로 흐름조건을  $0.6 < \frac{h}{D} < 1.0$  이라고 가정하면 표 3

에 의해

$$a=0.81, b=0.93, \xi=0.35, \eta=0.41$$

$$\sigma = -5 + (\eta + 2b) - \beta(1 + \eta - b) = -2.648$$

$$\lambda = (\eta + 2b) - \beta(\eta - b) = 2.1816$$

$$a_\xi = (a^{2+\beta} \xi^{1-\beta})^{-\frac{1}{\lambda}} = 2.095$$

$$S_D = \frac{D\nu}{Q} = 6.666 \times 10^{-7}$$

$$\gamma = a_\xi \alpha^{\frac{1}{\lambda}} S_D^{\frac{\sigma}{\lambda}} = 8798484$$

$$\delta = -\frac{5}{\lambda} = -2.292$$

$$T = \frac{1}{\nu} (Q_{gi})^{\frac{1}{5}} = 567382$$

$$S = \gamma T^\delta = 5.7 \times 10^{-7}$$

따라서 구하고자 하는 등류수심은 다음과 같다.

$$h = \frac{SQ}{\nu} = 1.71$$

가정한 조건이 맞는지 검증하면,

$$\theta = 2\cos^{-1}(1 - 2\frac{h}{D}) = 4.721 \text{ rad}$$

$$A = \frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta) = 2.860 \text{ m}^2,$$

$$H = \frac{A}{P} = \frac{r}{2}(1 - \frac{\sin\theta}{\theta}) = 0.606 \text{ m}$$

$$V = \frac{Q}{A} = 1.049 \text{ m/sec}$$

$$R_H = \frac{VH}{\nu} = 635694 \text{ (완난류 2구간)}$$

표 8. 수심비에 따른 경계유량

수로형태	h/D(t)	$Q_c$
원형	0.3	$Q_{0.3} = 0.225n^{-1} i^{0.5} D^{2.67}$
	0.6	$Q_{0.6} = 0.213n^{-1} i^{0.5} D^{2.67}$
U형	0.55	$Q_{0.55} = 0.188n^{-1} i^{0.5} D^{2.67}$

형상구간  $\frac{h}{D} = 0.86$ 이다.

흐름조건이 완난류 2구간이고,  $\frac{h}{D}$ 가 III구간이므로 가정한 조건이 모두 성립한다.

따라서 구하고자 하는 등류수심은 1.71m 이다.

### 5. Hagen(Manning) 식을 이용한 원형 및 U형 개수로 등류수심

Hagen (Manning) 식은 전난류 산정식으로서 우하수 관 흐름이 전난류인 경우에만 사용해야 하나 현재 실무에서 많이 쓰이기 때문에 본 절에서 간단히 논하기로 한다.

수식유도에 사용된 연속방정식과 Hagen(Manning) 식은 다음과 같다.

$$Q = AV \tag{13}$$

$$V = \frac{1}{n} H^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \tag{14}$$

Hagen (Manning) 식을 이용한 원형 및 U형 개수로의 등류수심 산정도 지수형으로 표기한 형상비를 이용하여 간단히 산정할 수 있다. 그러나 식 (1)로 표기된 마찰계수 산정식은 무차원화 되어 차원이 일치하나 Hagen (Manning)식은 차원의 불일치로 식 (15)와 같이 무차원수를 도입하지 않고 수심비를 직접 산정하는 근사식을 개발하였다. 연속방정식 (13)에 Hagen (Manning)식 (14)와 식 (6), 식 (7)을 대입하여 등류수심 산정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\frac{h}{D} = \left[ \frac{Q n}{a \xi^{0.67} i^{0.5} D^{2.67}} \right]^{\frac{3}{3b+2n}} \tag{15}$$

수심비에 따른 경계유량은 식 (15)에 각 경계조건인 수치를 대입하여 바로 구할 수 있으며 그 결과를 표 8에 제시하였다. 주어진 유량을 표 8에서 계산한 경계유

량과 비교하여 경계구간을 정확히 찾아낼 수 있다. 이를 통해 상수 a, b,  $\xi$ ,  $\eta$  를 결정하고 등류수심을 바로 산정할 수 있다.

### 6. 결 론

실무에서 하수관으로 가장 많이 쓰이는 원형관과 U형 수로에 대한 기하학적 단면해석을 통하여 단면적과 동수반경을 수심대 관경비의 지수 함수 형태로 나타내었으며, 지수형 마찰계수 산정식을 이용하여 무차원수 등류수심 양해법 산정식을 제시하였다. 또한 실무에서 많이 쓰이는 Manning 식도 수심과 관경의 형상비를 이용하여 양해법 산정식으로 제시하였다.

양해법 산정식과 정밀해의 오차는 동수반경 및 단면적을 수심대 관경의 형상비로 표현하는 과정에서 발생하는데 그림 2~5에서 제시된 바와 같이 오차가  $\pm 5\%$  미만을 나타내므로 상당히 신뢰할 수 있다. 양해법 산정식을 사용할 경우 반복시산에 의한 계산과정을 상당량 줄일 수 있으므로 매우 효율적이고, 하수관 설계 등의 프로그램 개발시 유리하다.

### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업(03산학연(03-01))에 의한 도시홍수재해관리기술 연구사업단의 연구성과입니다.

### 참 고 문 헌

유동훈 (2003). **최신수리학**. 도서출판 새론.  
 유동훈 (2003). “소유역 및 대유역 홍수유출모형의 적용”. **한국수자원학회 논문집**, 제36권, 제1호, pp. 87-104.  
 유동훈, 노정수 (2004). “개수로 흐름의 임계수심 산정식”. **대한토목학회 논문집**, 제24권, 제1호, pp. 19-23.  
 유동훈, 엄호식 (2001). “원형 암거의 간편설계”. **한국관개배수**, 제8권, 제1호, pp. 88-101.



- 유동훈, 이민호 (2000). "지수형 마찰계수 산정식". **대한토목학회 논문집**, 제20호, pp. 1-10.
- Colebrook, C.F. and White, C. M. (1937). "Experiments with fluid friction in roughened pipes", Proc. R. Soc. London, Ser. A, Vol. 161, pp. 367-381.
- Hicks, D. M. and Mason, P. D. (1998). *Roughness Characteristics of New Zealand Rivers*, National Institute of Water and Atmospheric Research Ltd.
- Nikuradse, J. (1933). "Stroemungsgesetze in rauhen Rohren." Ver. Dtsch Ing. Forsch, No. 361.
- Noori, B. M. A. (1984). "Form drag resistance of two dimensional stepped steep open channels," Proc. 1st Int. Conf. on Hydraulic Design in Water Resources Eng., Channels and Channel Control Structures, K. V. H. Smith, ed., Springer, pp. 133-147.
- Bray, D. I. (1979). "Estimating average velocity in gravel-bed rivers," *J. Hydraulics Div.*, ASCE, Vol. 105, No. 9, pp. 1103-1121.
- (논문번호:04-115/접수:2004.12.18/심사완료:2005.06.10)