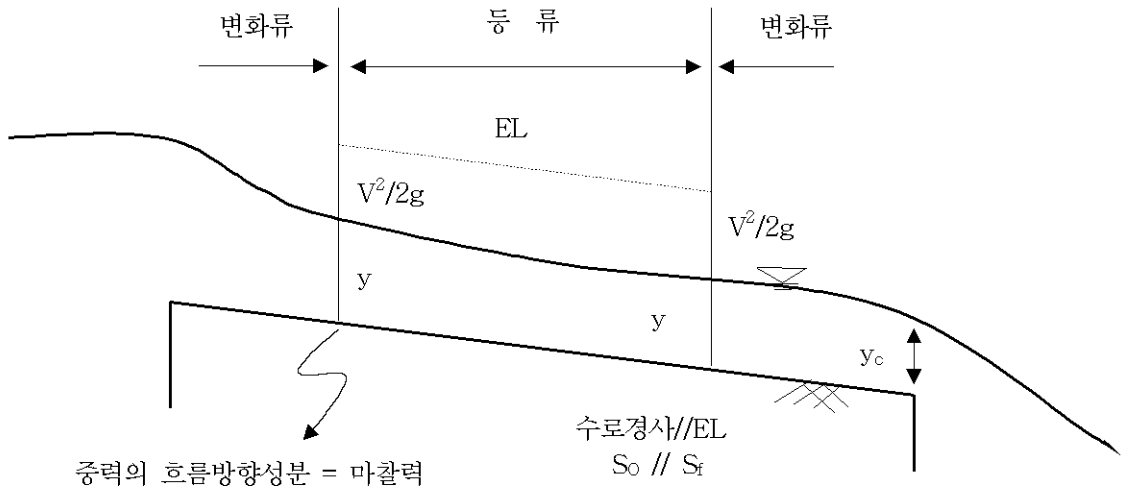
제 1 장 개수로-2

1.1 등류의 형성

• 개수로의 등류는 수심이나 통수단면, 평균유속, 유량 등 흐름의 특성이 수로구간의 모든 단면에서 항상 동일한 흐름을 말하며 수로경사와 에너지선의 경사가 동일

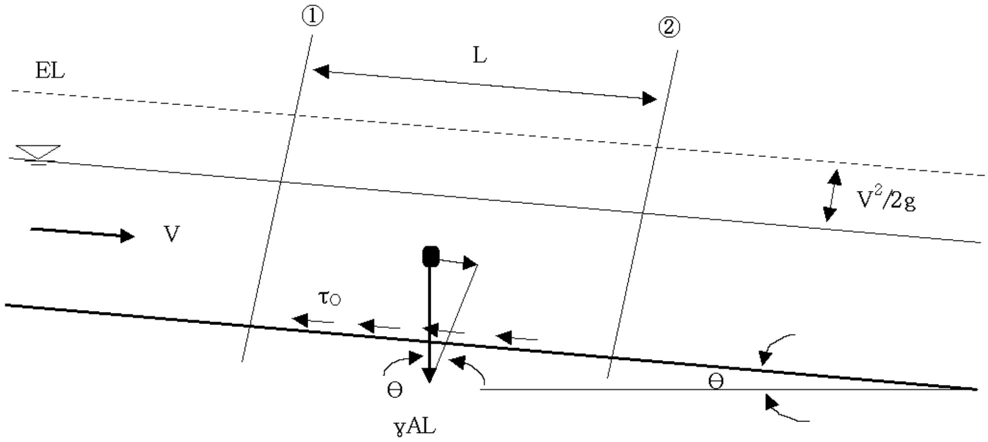
• 개수로에서 중력에 의해 흐름이 형성되면 물에 작용하는 중력의 흐름방향 성분에 저항하는 마찰력이 수로 바닥과 측벽에서 발생하게 되며, 이 마찰이 물에 미치는 중력의 흐름방향 성분과 같을 경우가 등류의 형성조건



1.2 등류의 경험공식

가. Chezy 공식

• 1755년 Chezy에 의해 제안되어 여러 등류공식의 근원이 된 공식이며 개수로 등류의 마찰력과 중력 흐름방향 성분이 같음을 이용하여 유도



• 일정한 수로경사 $S_0 = \tan\theta$와 동일한 단면을 가지는 개수로상의 두 단면 ①-①과 ②-② 사이의 등류에 작용하는 중력의 흐름방향 성분 F_g는 $F_g = \gamma A L \sin\theta$

여기서 γ는 물의 단위중량, A는 단면적, L은 수로구간 길이, θ는 수로의 경사각

• 상기에서 수로 경사각 θ가 작을 경우에는 $\sin\theta = \tan\theta = S_0$가 되므로 $F_g = \gamma A L S_0$

• 한편, 중력의 흐름방향 성분 F_g에 저항하는 마찰력 F_r의 크기는 단면에 작용하는 평균 마찰응력을 τ_0라 할 때 $F_r = \tau_0 P L$ 여기서 P는 윤변(wetted perimeter)

• 등류에서는 $F_g = F_r$이므로 τ_0에 풀면 $\tau_0 = \gamma R_h S_0$

여기서 τ_0는 수로 바닥과 양측벽에 작용하는 마찰응력의 평균치로서 평균단위소류력(unit tractive force), R_h는 단면의 동수반경으로 단면적 A를 윤변 P로 나눈 값

• 상기 식에서 τ_0를 평균유속의 항으로 표시하기 위하여 수로경사(등류에서는 에너지경사와 동일)를 $S_0 = h_L/L$로 놓고 h_L을 Darcy-Weisbach 공식을 이용한 후 대입하면 $\tau_0 = \dfrac{f\rho V^2}{8}$

여기서 ρ는 물의 밀도(γ/g)

• τ_0에 관해 두 식을 정리하면

$$V = \sqrt{\frac{8g}{f}}\sqrt{R_h S_0} = C\sqrt{R_h S_0}$$ (등류에 대한 Chezy의 평균유속공식)

• 위 식에서 C는 Chezy 계수라 하고 마찰손실계수 f와 $C = \sqrt{\dfrac{8g}{f}}$

• Chezy의 평균유속계수 C는 수로바닥의 조도와 단면의 동수반경 및 흐름의 Reynolds수의 함수이며, 경험식인 Kutter-Ganguillet 공식을 이러한 관계를 설정하는데 가장 많이 사용

나. Kutter-Ganguillet 공식

• Kutter-Ganguillet(1869)는 유량 실측자료를 해석한 결과를 토대로 Chezy의 평균유속계수 C를 결정하기 위한 다음과 같은 식을 제안

$$C = 0.552\left[\frac{41.65 + \dfrac{0.00281}{S_0} + \dfrac{1.811}{n}}{1 + \left(41.65 + \dfrac{0.00281}{S_0}\right)\dfrac{n}{\sqrt{3.28R_h}}}\right]$$

여기서 n은 수로바닥의 조도를 표시하는 Kutter의 n값, R_h는 동수반경, S_0는 수로바닥의 경사 혹은 에너지선의 경사

• Kutter의 n값은 후술되는 Manning의 n값과 동일한 것으로 알려져 있으며, 이 공식은 Manning의 공식의 등장과 함께 실무에서는 거의 사용되지 않는 공식

다. Manning 공식

• 아일랜드 기술자인 Manning(1889)은 여러 유량 측정자료와 각종 공식들을 조사하여 Chezy의 계수 C와 수로의 조도계수 n과의 관계를 $C = \dfrac{R_h^{1/6}}{n}$ 와 같이 수립

여기서 n은 Manning의 조도계수(roughness coefficient)라 하며 수로의 종류 및 상태에 따른 n값을 다음 페이지의 표와 같이 제시

• 이를 정리하면 Manning의 평균유속공식은 $V = \dfrac{1}{n} R_h^{2/3} S_0^{1/2}$

• Manning 공식은 수로 단면의 형상과 조도가 고려된 식이며 그 형태가 매우 간단할 뿐만 아니라, 현재까지의 적용 결과에 의하면 실제 유량에 근접하는 결과를 주므로 오늘날 개수로내 등류계산에 가장 널리 사용

• Manning의 조도계수(roughness coefficient) n값은 피복수로(lined channel)의 경우에는 결정하기가 비교적 쉬우나 자연하천수로의 경우는 하상 및 제방 구성재료의 다양성이라든지, 수로의 식생상태, 수로단면의 불규칙성 및 형상, 세굴 및 퇴적, 단면상태의 계절적 변화 등으로 인해 적당한 값을 결정하기가 매우 어려우므로 통상 숙련된 현장기술자의 건전한 판단에 의존할 수 밖에 없는 실정

1.3 복합단면수로의 등가조도

• 단순한 형태의 수로일지라도 윤변 전체에 걸쳐 Manning의 조도계수 n이 일정하지는 않으나 경계면 재료가 동일한 경우에는 적정한 값을 사용하지만, 통수단면의 윤변이 상이한 재료로 되어 있거나 혹은 윤변 각 부분의 조도가 판이하게 다를 경우에는 평균치로서 등가조도(equivalent roughness)를 계산하여 사용

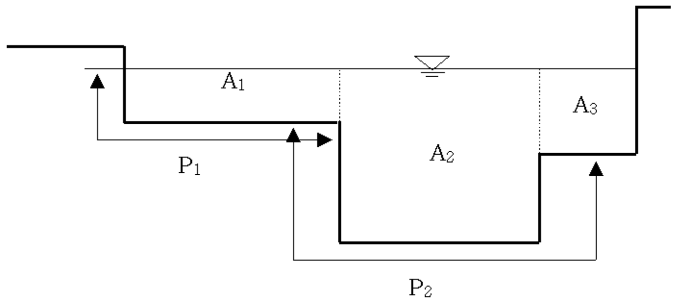
• 등가조도는 실험수로가 바닥은 나무로 되어 있고 측벽은 유리로 되어 있는 경우라든지, 자연하천수로에서 저수로와 둔치(고수부지)의 조도가 판이하게 다를 경우 등에 사용

• 등가조도 산출에는 Horton-Einstein 방법과 Pavlovskii 방법 등이 사용되며, 아래 그림과 같은 통수단면을 윤변의 국부적 조도 크기에 따라 N개 소구간으로 나누고 이들 소구간 윤변을 P_1 $P_2, \cdots, P_N$, 조도계수를 $n_1, n_2, \cdots, n_N$이라 할 때 등가조도 다음과 같이 산출

• Horton-Einstein의 등가 조도

$$n_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} P_i n_i^{1.5}}{\Sigma P_i}\right]^{2/3}$$

$$n_e = \left(\frac{P_1 n_1^{1.5} + P_2 n_2^{1.5} + P_3 n_3^{1.5}}{P_1 + P_2 + P_3}\right)^{2/3}$$



• Horton-Einstein 방법은 각 소구간의 유속은 전체 단면의 평균유속 V와 같다는 가정 ($V_1 = V_2, \cdots, V_N = V$)에서 유도

• Pavlovskii 방법은 각 소구간의 마찰력의 합이 전체 단면의 마찰력과 같다는 가정에서 유도되었으며, 등가조도는 $n_e = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} P_i n_i^2}{\Sigma P_i}\right]^{1/2}$

< 하천의 상태에 따른 조도계수(한국수자원학회) >

구 분	하천의 상태	조도계수 범위
인공수로 및 인공하천	콘크리트 인공수로	0.014~0.020
	나선형 반관수로	0.020~0.030
	양안에 돌붙임이 적은 수로	0.025
	암반을 굴착하여 방치한 하상	0.035~0.050
	다듬은 인공하상	0.025~0.040
	점토성 하상, 유속이 낮음	0.016~0.022
	사질 진흙, 점토질 진흙	0.020
	굴착 준설, 잡초 적음	0.025~0.033
자연하천	평야부 소하천, 잡초 없음	0.025~0.033
	평야부 소하천, 잡초와 관목 있음	0.030~0.040
	평야부 소하천, 잡초 많음, 잔자갈 하상	0.040~0.055
	산지하천, 바닥이 골재와 호박돌	0.030~0.050
	산지하천, 바닥이 호박돌과 큰 호박돌	0.040~0.070
	대하천, 점토와 사질하상, 사행이 적음	0.018~0.035
	대하천, 자갈하상	0.020~0.040

< 자연하천의 상태에 따른 조도계수(Chow) >

하천의 상태	최소값	중간값	최대값
1. 소하천: 홍수시 수면폭이 30m 이하			
(1) 평지하천			
① 깨끗한 직선수로이며, 수위가 높고, 깊은 소(pool)가 없는 경우	0.025	0.030	0.033
② ①과 같으나 잡초와 돌이 더 많은 경우	0.030	0.035	0.040
③ 하상에 만곡이 없고 약간의 소과 여울이 있는 경우	0.033	0.040	0.045
④ ③과 같으나 잡초와 돌이 더 많은 경우	0.035	0.045	0.050
⑤ ④와 같으나 수위가 낮고, 영향을 미치지 않는 경사와 단면이 더 많은 경우	0.040	0.048	0.055
⑥ ④와 같으나 ④보다 돌이 더 많은 경우	0.045	0.050	0.060
⑦ 유속이 느린 구간으로 잡초가 많으며 깊은 소가 경우	0.050	0.070	0.080
⑧ 잡초가 매우 많은 구간으로 깊은 소가 있으며 홍수로에 수목과 덤불이 무성한 경우	0.075	0.100	0.150
(2) 산지하천 : 하도내에는 식생이 없고 하안이 통상 급경사이며, 고수위시 잠기는 하안에는 수목과 덤불 등의 식생이 있음			
① 하상바닥이 자갈, 작은 호박돌과 약간의 호박돌로 구성된 경우	0.030	0.040	0.050
② 하상바닥이 작은 호박돌과 호박돌로 구성된 경우	0.040	0.050	0.070
2. 대하천: 홍수시 수면폭이 30m 이상 (하안이 작은 유효저항을 나타내므로 소하천의 조도계수보다 약간 작음)			
① 단면이 일정하고 호박돌이나 덤불이 없는 경우	0.025	-	0.060
② 단면이 불규칙하고 거친 심한 경우	0.035	-	0.100

1.4 등류의 계산

• 등류의 계산은 등류공식과 연속방정식을 사용하면 해결 가능하며, 등류공식으로는 주로 Manning 공식이 사용되며, Manning 공식을 연속방정식에 대입하면 다음과 같이 표시

$$Q = AV = \frac{1}{n} A R_h^{2/3} S_0 1/2 = K S_0^{1/2}$$

• 상기 식의 K는 다음과 같은 관계를 가짐을 알 수 있으며, K는 통수단면의 기하학적 형상과 조도계수에만 관계되는 것으로 이것이 개수로의 통수능(conveyance)

$$K = \frac{1}{n} A R_h^{2/3}$$

• 등류 계산에 포함되는 변수는 위 식에서 등류유량 Q, 평균유속 V, 등류수심(normal depth) y_n, 조도계수 n, 수로경사 S_0 및 수로단면의 형상에 따른 변수 A, R_h 등이며 이들 6개 변수 중 4개만 알면 나머지 2개의 변수는 계산 가능

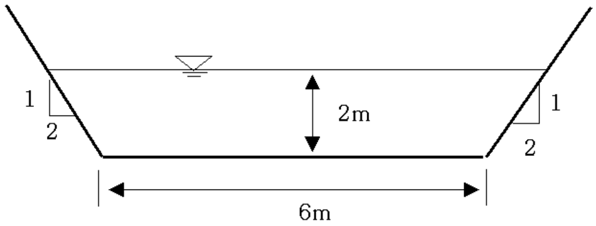
• 등류의 유량, 수심 및 평균유속, 수로경사 등을 산출하는 것이 등류 계산의 주요 목적

가. 등류의 유량 계산

• 개수로의 제원이 주어지고 등류수심이 결정되면 유량은 Manning 공식으로 계산 가능

• 개수로의 제원(n 및 S_0 포함)과 등류수심 y_n이 주어지면 A, P, R_h는 바로 계산 가능하며, 이와 같은 n, A, R_h, S_0를 Manning 공식에 대입하면 등류 유량 Q 산출이 가능

예제 1) n = 0.011, So = 0.0001일 때 유량?



풀이) $y_n = 2m$ 이므로

$$A = 6\times2 + (\frac{1}{2}\times2\times4)\times2 = 20m^2, \quad P = 6 + 2(\sqrt{2^2+4^2}) = 14.94m, \quad R = \frac{A}{P} = 1.339m$$

$$\therefore\ Q = \frac{1}{n}AR^{2/3}S_0^{1/2} = \frac{1}{0.011}\cdot 20 \cdot (1.339)^{2/3} \cdot (0.0001)^{1/2} = 8.84m^3/sec$$

나. 등류의 수심과 평균유속 계산

• 개수로내 등류의 수심과 평균유속을 계산하기 위한 방법으로 개수로의 제원(n 및 S_0 포함) 및 등류 유량 Q가 주어지면 다음과 같은 절차로 수행

- 구하고자 하는 등류수심 y_n이 변수 상태인 R_h(A/P)와 V(Q/A)의 계산식을 수립한 후, 이 두 계산식을 Manning 공식에 대입하면 변수는 등류수심 y_n 하나이나 상당히 복잡한 식이 수립되며 이를 시행착오법, 뉴톤-랩슨법 등으로 풀어서 등류수심 y_n 산출이 가능

- 등류수심 y_n이 결정되면 이에 해당하는 통수단면적 A_n이 계산되며, 평균유속 V_n은 Q/A_n로 산출 가능

예제 2) 예제 1과 같은 단면에서 $S_0 = 0.016$, $n = 0.025$, $Q = 12m^3/sec$ $y_n = ?$, $V = ?$

풀이) $A = 6y_n + 2(\frac{1}{2}\times y_n \times 2y_n) = y_n(6+2y_n), \quad P = 6 + 2\times(\sqrt{y_n^2 + (2y_n)^2} = 6 + 2\sqrt{5}y_n$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{y_n(6+2y_n)}{6+2\sqrt{5}y_n}, \qquad Q = \frac{1}{n}AR^{2/3}S_0^{1/2}$$

$$12 = \frac{1}{0.025}y_n(6+2y_n)[\frac{y_n(6+2y_n)}{6+2\sqrt{5}y_n}]^{2/3}(0.001)^{1/2}$$

계산기 등의 뉴톤-랩슨방법으로 위 식을 풀면 $y_n = 1.07m$

등류 수심에 해당하는 동수 단면적은 $A_n = 1.07(6+2\times1.07) = 8.7m^2$

평균 유속 $V = \frac{Q}{A^n} = 1.38m/sec$

다. 등류의 수로경사 계산

• 단면이 일정한 개수로의 조도계수와 유량이 주어질 때 수심 y_n으로 등류가 흐를 수 있는 수로경사를 등류 수로경사(normal slope) S_n라 하며, 이는 Manning 공식을 사용하면 계산 가능

• 개수로의 제원(n 포함)이 주어지고 등류수심 y_n이 주어지면 A_n, P_n, R_{hn}는 바로 계산되며, 이와 같은 n, A_n, R_{hn}을 Manning 공식에 대입하면 등류 수로경사 S_n 산출이 가능

예제 3) 예제 2의 개수로에서 $y_n = 1.07\text{m} \rightarrow S_n = ?$

풀이) $y_n = 1.07$ 이므로 $A_n = 8.71\text{m}^2$, $P_n = 10.79\text{m}$, $R = 0.807\text{m}$

$$12 = \frac{1}{0.025} \cdot 8.71 \cdot 10.79^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \qquad \therefore S_0 = 0.0016$$

1.5 최량수리단면

• 개수로의 단면형에는 여러 가지가 있으며 수로의 경사와 조도가 일정하게 주어질 때 최대유량의 소통이 가능하게 하는 가장 경제적인 단면의 결정은 개수로 설계를 위해 중요

• Manning 공식에서 동수반경과 단면적을 윤변으로 나타내면 $Q = \frac{1}{n}\left(\frac{A^5}{P^2}\right)^{1/3} S_0^{1/2}$

• 상기 식에서 n, S_0가 주어지면 A^5/P^2가 최대일 때 유량 Q가 최대가 되며 A와 P는 모두 수로내의 수심 y의 함수이므로 A^5/P^2가 최대가 되기 위한 조건은 다음과 같이 표시

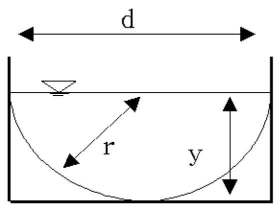
$$\frac{d}{dy}\left(\frac{A^5}{P^2}\right) = 0 \rightarrow \quad 5\frac{A^4}{P^2}\frac{dA}{dy} - 2\frac{A^5}{P^3}\frac{dP}{dy} = 0 \rightarrow \quad 5P\frac{dA}{dy} - 2A\frac{dP}{dy} = 0$$

• 수로의 설계단면 A가 일정하게 주어질 경우 $dA/dy = 0$이므로 이 식에서 유량이 최대가 될 조건은 $\frac{dP}{dy} = 0$

• 상기 식은 주어진 일정 단면적 조건하에서 윤변 P가 최소일 때 유량이 최대가 됨을 의미하며, 이와 같은 조건을 만족시키는 단면을 최량수리단면(best hydraulic section)이라 함. 역으로 일정한 유량 조건이 주어지는 경우에도 최량수리단면은 윤변이 최소인 단면이므로 단면적 또한 최소가 되는 가장 경제적인 단면

• 최량수리단면의 정의에 따르면 주어진 통수단면적을 가지면서 윤변의 길이가 최소가 되는 절대조건을 만족시키는 단면은 기하학적으로 볼 때 반원단면임을 쉽게 알 수 있으나, 반원단면은 시공 및 유지관리가 대단히 복잡하므로 통상 구형(사각형) 및 제형단면(사다리꼴형)을 많이 사용

가. 구형단면 수로의 최량수리단면



• 구형단면의 경우 옆의 그림과 같이 수심을 y, 수로폭을 b 라 하면 단면적과 윤변은 $A = by$, $P = b + 2y$

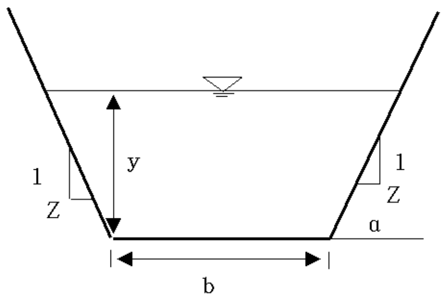
• 단면적 A가 일정하게 주어질 때 b를 y의 항으로 표시하면 $b = A/y$이며 윤변 P는 $P = \frac{A}{y} + 2y$

• 최량수리단면은 $dP/dy = 0$이므로 $\frac{dP}{dy} = -\frac{A}{y^2} + 2 = 0 \quad \therefore y = \frac{b}{2}$ or $b = 2y$

• 따라서, 가장 경제적 구형단면은 수심이 수로폭의 절반인 경우 동수반경은 수심의 절반

$$R_h = \frac{A}{P} = \frac{2y^2}{4y} = \frac{y}{2}$$

나. 제형단면 수로의 최량수리단면



• 제형단면의 경우 옆의 그림과 같이 수심을 y, 수로폭을 b, 측면경사를 z(수평 z : 수직 1) 라 하면 단면적과 윤변은 $A = by + zy^2$, $P = b + 2y\sqrt{1+z^2}$

• 위에서 수로폭 b는 윤변과 $b = P - 2y\sqrt{1+z^2}$

• 단면적은 $A = (P - 2y\sqrt{1+z^2})y + zy^2$

• 수로경사, 조도 및 유량이 주어지면 소요단면적 A는 일정하므로 z를 상수로 보고 수심 y에 관해 미분하여 최량수리단면은 $dP/dy = 0$를 적용하면 $P = 4y\sqrt{1+z^2} - 2zy$

• P를 최소로 하는 z를 구하기 위해 z에 관해 미분해 $dP/dz = 0$이면 $z = \frac{1}{\sqrt{3}}$

• 위 z에 관한 결과는 측면경사각 $\alpha = 60°$임을 뜻하며 이를 대입해 최량수리단면의 제원을 수심의 항으로 나타내면 $P = 2\sqrt{3}y$, $b = \frac{2\sqrt{3}}{3}y$, $A = \sqrt{3}y^2$

• 위에서 제형단면에서 최량수리단면은 정육각형의 절반형(half-hexagon)임을 알 수 있으며, 제형단면의 최량수리단면의 동수반경은 수심의 절반이며 이는 구형단면의 경우와 동일

$$R_h = \frac{\sqrt{3}y^2}{2\sqrt{3}y} = \frac{y}{2}$$

• 일정단면적을 가진 단면에서 최대유속을 발생시키는 단면 조건도 최대유량을 통수시키기 위한 조건인 윤변이 최소가 되는 최량수리단면의 조건이지만 만약, 수로의 경사가 커지게 되면 이에 상응하는 유속도 커져 세굴현상을 일으키게 되므로, 허용유속을 높이기 위해 수로피복이 필요한 등 이 경우를 최량수리단면으로 채택하는 것은 곤란

• 또한, 제형단면 수로의 측면경사 z는 암반에 수로를 굴착할 경우 이외에는 시공상의 이유 등으로 인하여 1.5 부근에서 설계

예제 4) 제형단면 수로, $S_0 = 0.0001$, $n = 0.02$, $Q = 10m^3/sec$일 때 최량수리단면?

풀이) $10 = \frac{1}{0.022}(\sqrt{3}y^2)(\frac{y}{2})^{2/3}(0.0001)^{1/2}$

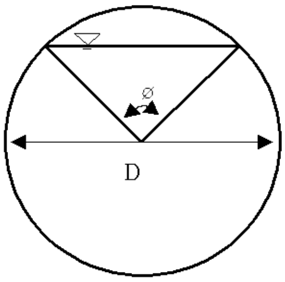
$$y^{8/3} = 20.16 \rightarrow y = 3.08m$$

$$b = \frac{2\sqrt{3}}{3}y = 3.56\ m$$

$$z = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.557\ m$$

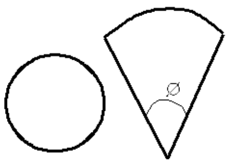
1.5.1 폐합관거내의 개수로 흐름

- 우수 및 하수를 배제하기 위한 폐합관거는 압력흐름인 관수로가 아니라 자유표면을 가지는 중력흐름인 개수로로 설계되므로 등류공식을 적용
- 우수관거나 하수관거로 사용되는 콘크리트 관은 제작이 용이하고 취급이 쉬우므로 여러 가지 크기로 제작 판매되고 있으며 조도계수 n값으로는 0.012~0.014가 주로 사용
- 이들 관거의 단면은 통상 원형이며 관내의 수심에 따른 유량과 평균유속의 변화를 살펴봄으로써 관거의 수리특성을 이해하는 것이 가능
- 다음 그림과 같이 직경 D인 원형관수로내에 수심 d로 물이 흐를 때 수면과 단면의 중심이 이루는 각을 ∅ radian이라고 하면 단면적 A와 윤변 P 및 동수반경 R_h는 다음과 같이 표시

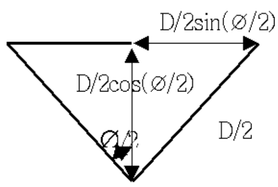


폐합관로내 개수로 수위면까지의 면적

$$A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{D^2\Phi}{8} + \frac{D^2}{4}\sin\frac{\Phi}{2}$$



$$\frac{x}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{\Phi}{2\pi} \rightarrow \therefore x = \frac{D^2\Phi}{8}$$



$$\sin 2\Theta = 2\sin\Theta\cos\Theta \rightarrow \sin\frac{\Phi}{2}\cdot\cos\frac{\Phi}{2} = \frac{1}{2}\sin\Phi$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{D^2\Phi}{8} + \frac{D^2}{4}\sin\frac{\Phi}{2}\cos\frac{\Phi}{2} = \frac{\pi D^2}{4} - \frac{D^2\Phi}{8} + \frac{D^2}{4}\sin\Phi$$

$$= \frac{D^2}{4}\left(\pi - \frac{\Phi}{2} + \frac{\sin\Phi}{2}\right)$$

$$P = \pi D - \frac{D}{2}\Phi = D\left(\pi - \frac{\Phi}{2}\right), \quad R_h = \frac{A}{P} = \frac{D}{4}\left(1 + \frac{\sin\Phi}{2\pi - \Phi}\right)$$

• 만약 관거의 조도계수 n과 수로경사 S_0가 일정하게 주어지면 Manning의 등류 유량공식 $Q=(1/n)AR_h^{2/3}S_0^{1/2} = C'AR_h^{2/3}$($C'=(1/n)S^{1/2}$= 일정)으로 나타낼 수 있으며 정리하면,

$$Q = C'\frac{D^2}{4}\left[\pi - \frac{\phi}{2} + \frac{\sin\phi}{2}\right]\left[\frac{D}{4}\left(1+\frac{\sin\phi}{2\pi-\phi}\right)\right]^{2/3} = C'\frac{D^{8/3}}{10.08}\left(\pi - \frac{\phi}{2} + \frac{\sin\phi}{2}\right)\left(1+\frac{\sin\phi}{2\pi-\phi}\right)^{2/3}$$

• 관거내에 물이 가득 차서 흐르는 만관흐름($\varnothing$=0)의 유량은 $Q_F = \dfrac{C'\pi D^{8/3}}{10.08}$

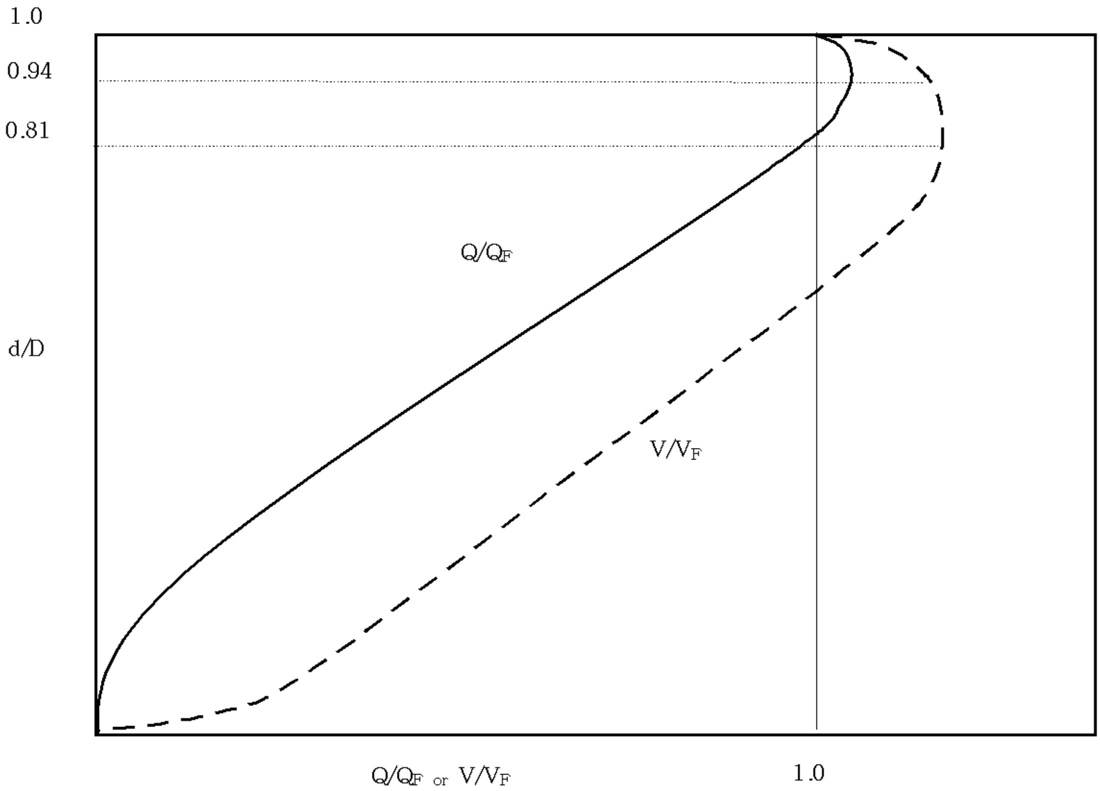
• 수위별 유량과 만관상태의 유량과의 비는 $\dfrac{Q}{Q_F} = \dfrac{1}{\pi}\left(\pi - \dfrac{\phi}{2} + \dfrac{\sin\phi}{2}\right)\left(1 + \dfrac{\sin\phi}{2\pi-\phi}\right)^{2/3}$

• 위 관계를 수심비 d/D에 따른 유량비 Q/Q_F로 나타내면 다음 페이지 원형단면의 수리특성곡선

• 최대유량 Q_{max}에 해당하는 상대수심은 $\varnothing$=57°36′이고 이는 수리특성곡선으로부터 d/D가 0.94일 경우이며 이때 $Q_{max}/Q_F = 1.08$

• 만관흐름 유속 V_F와 다른 유속 V의 비는 $\dfrac{V}{V_F} = \left(1 + \dfrac{\sin\phi}{2\pi-\phi}\right)^{2/3}$

• 상기 식의의 관계는 <그림 8.15>에 점선으로 표시하였으며, 최대유속은 ϕ = 102° 33′ 일 때 이고 $V_{max}/V_F = 1.14$일 경우임이 증명



< 수리특성 곡선 >