수리학 (II) 강의노트

교수　　이동주

2016년　2월　28 일

군산대학교 토목공학과 수리실험실

제5장 개수로 흐름(OPEN CHANNEL FLOW)

[개수로(OPEN CHANNEL)]

대기압을 받으며 **자유 수면**을 갖고 **중력**에 의해 물이 흐르는 수로
참고 : 관수로는 **만수**이고 **수압**에 의해 물이 흐르는 수로

단면형별 분류
인공수로 : 원형, 사각형, 사다리꼴형, 난형, 마제형 **규칙단면형**
자연하천 : **불규칙 단면형**

용도별 분류 :
1. 이수,치수를 위한 하천
2. 다목적 댐의 여수로, 취수로
3. 농업용 관개수로
4. 상하수도용 송수관, 배수관, 급수관, 하수관
5. 공업용 용수로

농업용수로

경포천 | 하천 표제어 ▸

낙동강24공구 = 칠곡보

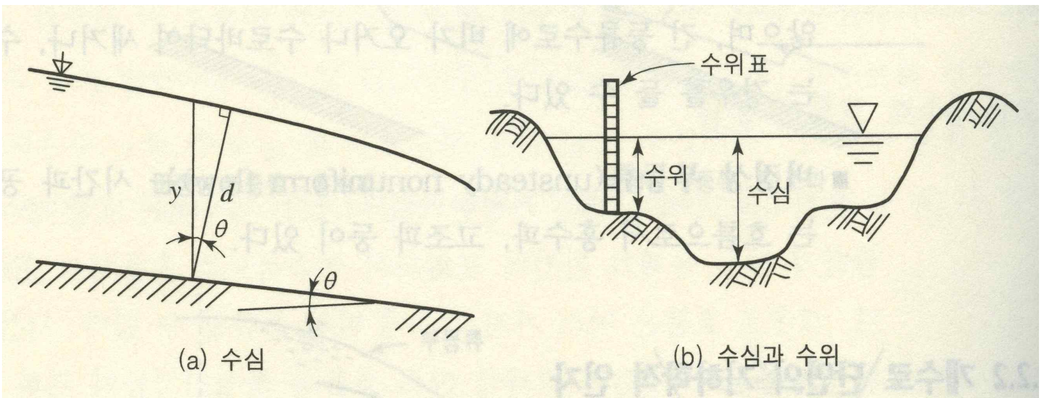
수문시공 사진

[다목적댐둘러보기] 부안댐

5.1 개수로 단면의 용어

(1) **수심(depth of flow)** : 자유수면에서 수로바닥까지의 연직거리 $h(m)$

$$h = \frac{d}{\cos\theta} \qquad \theta \ll 0,\ h \fallingdotseq d$$



(2) **수위(stage)**

어떤 수평기준면(D.L)으로부터 측정한 자유수면의 높이

(3) 수로폭(top width) : B (m)

자유수면에서 수로 단면의 폭

(4) 윤변(wetted perimeter) : P (m)

흐름에 수직인 마찰이 작용하는 주변의 길이

(5) 유적(flowing section area) : A (m^2)

유수 단면적

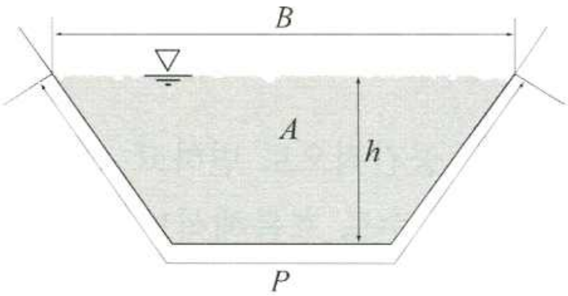
(6) 경심(hydraulic radius) : R (m)

동수반경, 수리평균심

$$R = \frac{A}{P}$$

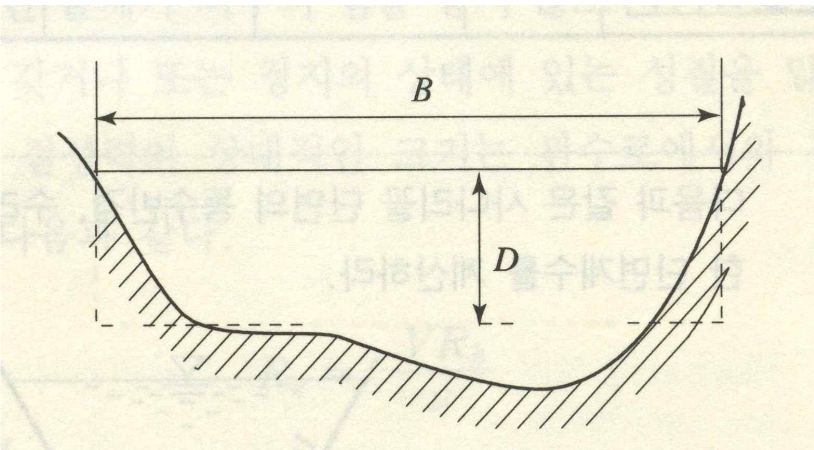
수심(h)에 비하여 수로폭(B)이 충분히 넓은 경우(B>20h)는 경심(R) 대신 수심(h)를 사용.

$$R \fallingdotseq h$$



(7) 수리심(hydraulic depth) : D (m)

$$D = \frac{A}{B}$$



(8) 한계류 계산을 위한 단면계수 : Z

$$Z = A\sqrt{D}$$

표 5.1 각종 개수로 단면형의 수리량 계산식

단 면	단면적 A	윤 변 P	경 심 R	수면폭 B	수리심 D	단면계수 Z
구형	by	$b+2y$	$\frac{by}{b+2y}$	b	y	$by^{1.5}$
사다리꼴형	$(b+zy)y$	$b+2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{(b+zy)y}{b+2y\sqrt{1+z^2}}$	$b+2zy$	$\frac{(b+zy)y}{b+2zy}$	$\frac{[(b+zy)y]^{1.5}}{\sqrt{b+2zy}}$
3각형	zy^2	$2y\sqrt{1+z^2}$	$\frac{zy}{2y\sqrt{1+z^2}}$	$2zy$	$\frac{y}{2}$	$\frac{\sqrt{2}}{2}zy^{2.5}$
원형	$1/8(\theta-\sin\theta)d_0^2$	$(1/2)\theta d_0$	$1/4\left(1-\frac{\sin\theta}{\theta}\right)d_0$	$\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)d_0$ 또는 $2\sqrt{y(d_0-y)}$	$1/8\left(\frac{\theta-\sin\theta}{\sin\frac{\theta}{2}}\right)d_0$	$\frac{\sqrt{2}(\theta-\sin\theta)^{1.5}}{32\left(\sin\frac{\theta}{2}\right)^{0.5}}d_0^{2.5}$
포물선형	$2/3By$	$B+\frac{8y^2}{3B}$	$\frac{2B^2y}{3B^2+8y^2}$	$\frac{3A}{2y}$	$2/3y$	$2/9\sqrt{6}By^{1.5}$
양옆이 둥근 구형	$\left(\frac{\pi}{2}-2\right)r^2+(b+2r)y$	$(\pi-2)r+b+2y$	$\frac{(\pi/2-2)r^2+(b+2r)y}{(\pi-2)r+b+2y}$	$b+2r$	$\frac{(\pi/2-2)r^2}{b+2r}+y$	$\frac{[(\pi/2-2)r^2+(b+2r)y]^{1.5}}{\sqrt{b+2r}}$
바닥이 둥근 3각형	$\frac{B^2}{4z}-\frac{r^2}{z}\times(1-z\cot^{-1}z)$	$B^2\sqrt{1+z^2}-\frac{2r}{z}\times(1-z\cot^{-1}z)$	$\frac{A}{P}$	$2[z(y-r)+r\sqrt{1+z^2}]$	$\frac{A}{B}$	$A\sqrt{\frac{A}{B}}$

예제 5.1 사다리꼴 단면의 수로에서 바닥폭이 2m, 수심 1m, 측면경사가 2:1일 때 동수반경(R) 을 구하라

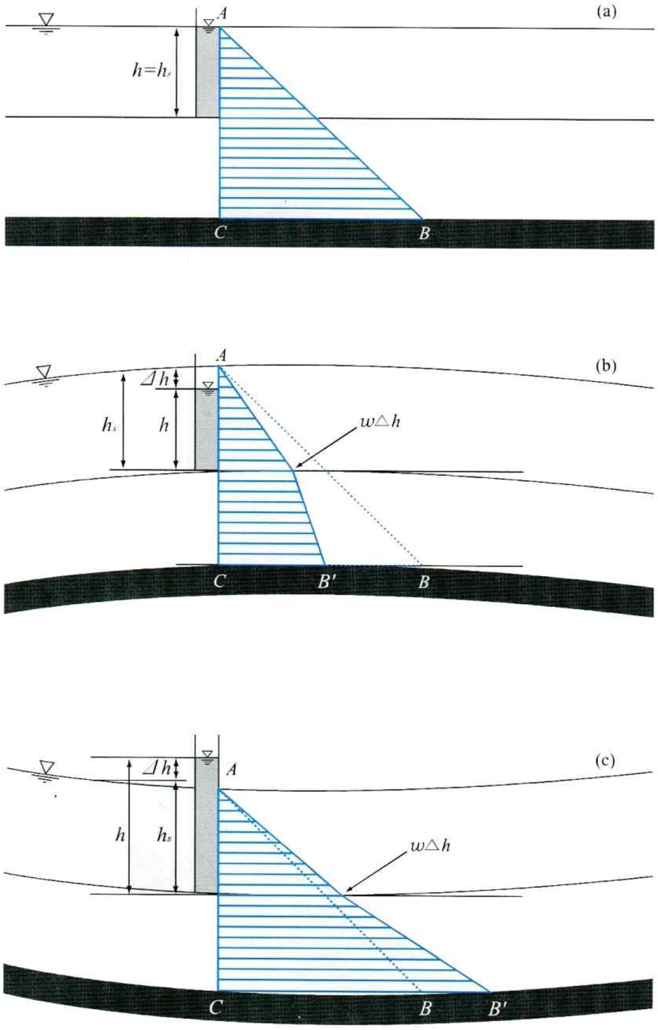
(풀이)

$$A = (b+zy)y = (2+2\times1)\times1 = 4m^2$$

$$P = b+2y\sqrt{1+z^2} = 2+2\times1\times\sqrt{1+2^2} = 6.47m$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{4}{6.47} = 0.62m$$

5.2 개수로 단면의 압력분포



원심가속도 : $\alpha_r = \dfrac{V^2}{r}$

수주의 원심력 : $p = \rho h_s \dfrac{V^2}{r}$

만곡으로 원심력에 의한 수압변화: $\Delta h = \dfrac{p}{w} = \dfrac{h_s}{g}\dfrac{V^2}{r}$

수로 바닥이 위로 볼록인 경우 압력: $h = h_s - \Delta h = h_s - \dfrac{h_s}{g}\dfrac{V^2}{r}$

수로 바닥이 위로 오목인 경우 압력: $h = h_s + \Delta h = h_s + \dfrac{h_s}{g}\dfrac{V^2}{r}$

5.3 개수로의 유속분포와 평균유속공식

1) 평균유속과 유속분포

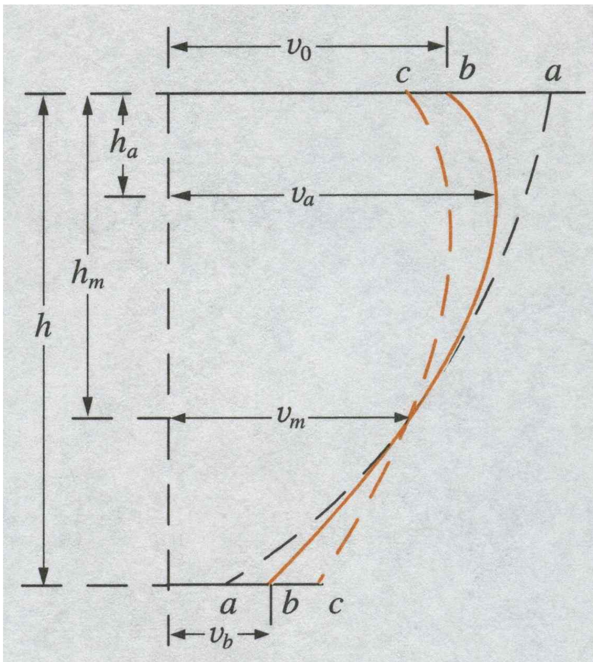
개수로의 수류의 속도는 벽면의 마찰, 점성, 표면장력, 단면형 및 수로의 불규칙성 등의 영향을 받으므로 대푯값으로 **평균유속**$(v_m,\ V)$을 정한다.

개수로 유속분포

Vanoni 연직방향의 유속 분포식 : $\dfrac{v-v_{\max}}{u_*}=\dfrac{2.3}{\kappa}log\dfrac{y}{h}$

여기서 마찰속도 $u_* = \sqrt{\dfrac{\tau_0}{\rho}} = \sqrt{gRI} \ \fallingdotseq \sqrt{ghI}$

* 연직방향의 유속분포도



$\dfrac{h_m}{h}=0.5 \ \sim 0.8 \fallingdotseq 0.6,\ \dfrac{h_a}{h}=0 \sim 0.25$

Rankine에 의하면 보통수로의 경우 $v_0 : v_m : v_b = 5:4:3$

완만한 수로의 경우 $v_0 : v_m : v_b = 4:3:2$

< 평균유속 계산법 >

① 1점법

$$v_m = v_{0.6}$$

② 2점법

$$v_m = \frac{1}{2}(v_{0.2} + v_{0.8})$$

$*$ US Geological survey에서 권장

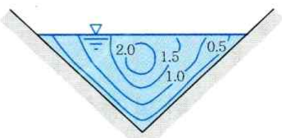
③ 3점법

$$v_m = \frac{1}{4}(v_{0.2} + 2v_{0.6} + v_{0.8})$$

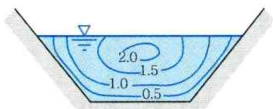
④ 4점법

$$v_m = \frac{1}{5}[v_{0.2} + v_{0.4} + v_{0.6} + v_{0.8} + \frac{1}{2}(v_{0.2} + \frac{v_{0.8}}{2})]$$

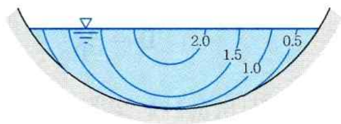
* 수평 유속분포



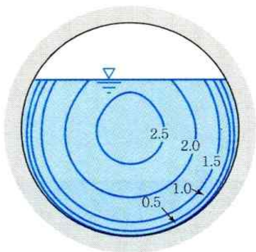
삼각형수로



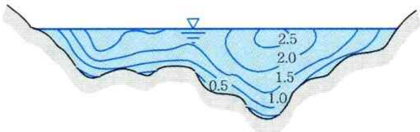
사다리꼴수로



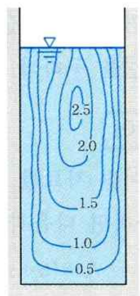
얕은 배수로



원형수로



자연수로



사각형수로

예제 5.2 자연하천에서 측정된 연직선상의 유속분포가 다음과 같다. 평균유속을 구하라.

수심비	유속(m/sec)
0.05	0.36
0.20	0.35
0.40	0.34
0.60	0.32
0.80	0.28
0.95	0.20

(풀이)

1) 1점법

$$v_m = v_{0.6} = 0.320 m/\sec$$

2) 2점법

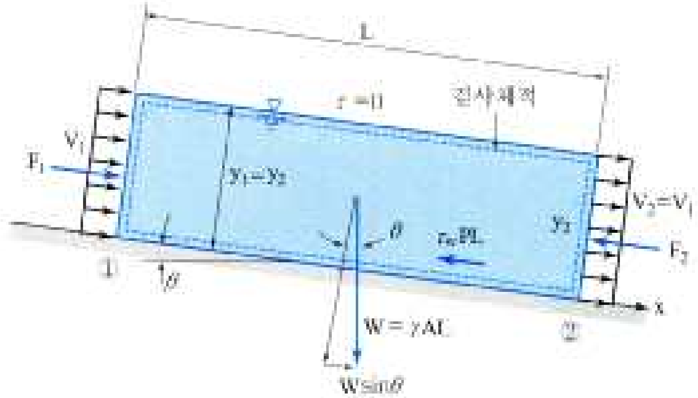
$$v_m = \frac{1}{2}(v_{0.2} + v_{0.8}) = \frac{1}{2}(0.35 + 0.28) = 0.315 m\text{/sec}$$

3) 3점법

$$v_m = \frac{1}{4}(v_{0.2} + 2v_{0.6} + v_{0.8}) = \frac{1}{4}(0.35 + 2 \times 0.32 + 0.28) = 0.318 m\text{/sec}$$

2) 등류의 평균 유속 공식

<등류 평균유속공식 유도>



x 방향으로 운동량방정식을 적용하면 $V_1 = V_2$이므로

$$\sum F_x = \rho Q(V_2 - V_1) = 0$$

따라서

$$\sum F_x = F_1 - F_2 - \tau_w PL + W sin\theta = 0$$

$y_1 = y_2,\ \ F_1 = F_2$이므로

$$\tau_w = \frac{W sin\theta}{PL} = \frac{W I_0}{PL}$$

여기서, $\theta \ll 0, \sin\theta = \tan\theta = I_0$이고, $W = wAL$이고, $R = \dfrac{A}{P}$이므로

$$\tau_w = \frac{wALI_0}{PL} = wRI_0$$

Reynolds 수가 큰 난류의 경우 마찰응력은 동압력에 비례하므로

$$\tau_w = K\frac{\rho V^2}{2}$$

여기서 K는 조도에 따른 상수이다.

$$K\frac{\rho V^2}{2} = wRI_0 = \rho g RI_0$$

$$V = C\sqrt{RI_0}$$

여기서 유속계수 $C = \sqrt{\frac{2g}{K}}$ 이고 위식을 **Chezy 평균유속 공식**이라 한다.

(1) Chezy의 평균유속공식

$$V = C\sqrt{RI_0}$$

$$C = \sqrt{\frac{8g}{f}}$$

C는 **Chezy유속계수**라 한다.

(2) Manning 평균공식

$$V = \frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}\ [m/\mathrm{sec}]$$

n은 **Manning의 조도계수**이다.

$$C = \frac{1}{n}R^{1/6}$$

수로구분	표면의 상태	n
관로	주철관(cast iron)	0.010~0.014
	리벳강관(riveted steel)	0.014~0.017
	콘크리트관(concrete)	0.011~0.015
자연 하천수로	잡초가 없는 직선형 흙 수로 하상 골재 크기 75 mm 이하	0.02~0.025
	잡초가 없고 선형이 나쁜 흙 수로	0.03~0.05
	잡초가 우거지고 선형이 나쁜 흙 수로	0 05~0.15
	잡초가 없는 직선형 자갈 수로 (하상 골재 크기 75 150 mm)	0.03~0.04
	잡초가 없고 선형이 나쁜 자갈 수로	0.04~0.08
	산간하천수로 (하상 골재 크기 150 mm 이상	0 04~0.07
비피복 인공수로	선형이 좋은 흙 수로	0.018~0.025
	하상이 돌로 된 상태가 나쁜 흙 수로	0.025~0.040
	암반 수로	0.025~0 045
피복수로	콘크리트 수로	0.012~0.017
	목재 수로	0.011~0.013
	아스팔트 수로	0.013~0.016
모형수로	시멘트 몰탈 수로	0.011~0.013
	매끈한 목재 수로	0.009~0.011
	유리 수로	0.009~0.010

(3) Ganguillet - Kutter 공식

$$V = C\sqrt{RI_0}$$

$* \ I_0 > \dfrac{1}{1000}$ 이며 $0.2m < R < 1.0m$ 인 상태에서

$I_0 > \dfrac{1}{3000}$ 일 때는 간략식 사용

$$C = \frac{23 + \dfrac{1}{n}}{1 + 23 + \dfrac{n}{\sqrt{R}}}$$

또 계산상 편리를 위하여 N, D 식을 사용한다.

$$N = (23 + \frac{1}{n} + \frac{0.00155}{I_0})\sqrt{I_0}$$

$$D = (23 + \frac{0.00155}{I_0})n$$

$$\therefore V = \frac{NR}{D + \sqrt{R}} (m/\sec)$$

(4) Bazin 공식

$$V = C\sqrt{RI_0}$$

$$C = \frac{87}{1 + \frac{m}{\sqrt{R}}} \qquad m \text{ : 조도계수}$$

<복합단면 수로의 등가조도 (n_e) 공식>

복합단면에서 조도가 부분적으로 다른 경우 단일 조도인 **등가조도**로 환산하는 식은 다음과 같다.

* **Horton - Eeinstein 식**

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

* **Pauloukin 식**

$$n_e = [\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i n_i^{2})}{\sum_{i=1}^{N} P_i}]^{\frac{1}{2}}$$

* 마찰력을 반드시 고려

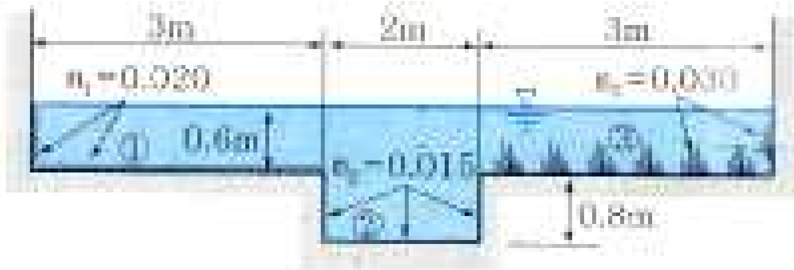
n_e : 등가조도

n : 조도계수

N : 소구간 수

P : 윤변

예제 5.3 그림과 같은 복합단면에서 **등가조도를** Horton-Einstein방법에 의해 구하라.



(풀이)

$$\sum P_i n_i^{3/2} = P_1 n_1^{3/2} + P_2 n_2^{3/2} + P_3 n_3^{3/2}$$

$$= (0.6+3) \times 0.02^{3/2} + (0.8+2+0.8) \times 0.015^{3/2} + (3+0.6) \times 0.03^{3/2}$$

$$= 0.0355$$

윤변의 총합은

$$\sum P_i = P_1 + P_2 + P_3$$

$$= 0.6+3+0.8+2+0.8+3+0.6$$

$$= 10.8m$$

따라서 등가조도는

$$n_e = [\frac{\sum_{i=1}^{N}(P_i n_i^{1.5})}{\sum_{i=1}^{N} P_i}]^{2/3} = (\frac{0.0355}{10.8})^{2/3} = 0.022$$

<등류 유량 및 수심계산>

Manning 유량 공식 : $Q = AV = A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}\,[m^3/\mathrm{sec}]$

예제 5.4 사다리꼴 단면 수로의 경사가 0.0016이고, 저폭이 3m, 측벽경사가 1.5:1, 조도계수가 0.013이면 등류유량은 얼마인가?

(풀이)

$$A=(b+zy)y=(3+1.5\times 2.6)\times 2.6=18m^2$$
$$P=b+2y\sqrt{1+z^2}=3+2\times 2.6\times \sqrt{1+1.5^2}=12m$$
$$R=\frac{A}{P}=\frac{18}{12}=1.5m$$

따라서

$$Q=A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}=18\times\frac{1}{0.013}\times 1.5^{2/3}\times 0.0016^{1/2}=73m^3/\sec$$

예제 5.5 사다리꼴 단면 수로에 유량이 $30m^3/\sec$c 흐르고 있다. 수로 저폭이 10m이고 측벽 경사가 2:1이다. 수로의 경사가 0.001이고, 조도계수가 0.013이면 등류수심은 얼마인가?

(풀이)

$$Q=A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}$$

$$AR^{2/3}=\frac{nQ}{I_0^{1/2}}=\frac{0.013\times 30}{0.001^{1/2}}=12.33$$
$$A=y(10+2y)$$
$$P=b+2y\sqrt{1+2^2}=10+4.47y$$
$$R=\frac{y(10+2y)}{10+4.47y}$$
$$[y(10+2y)][\frac{y(10+2y)}{10+4.47y}]^{2/3}=12.33$$

따라서

$$[y(10+2y)^{5/3}-12.33\times(10+4.47y)^{2/3}=0$$

계산기를 이용하여 **시행 착오법**으로 y를 구하면

$$\therefore y=1.09m$$

<수리상 유리한 단면(Best hydraulic cross section)>

수로 단면적(A)가 일정할 때 유량이 최대로 흐를 수 있는 수로단면을 **수리상 유리**

한 단면 이라 한다.

① $Q = AV$에서

유량(Q)이 최대가 되려면 유속(V)이 최대이어야 한다.

② $V = C\sqrt{RI}$ 에서

유속(V)이 최대가 되려면 경심(R)이 최대이어야 한다.

③ $R = \dfrac{A}{P}$

경심(R)이 최대가 되려면 윤변(P)가 최소가 되어야 한다.

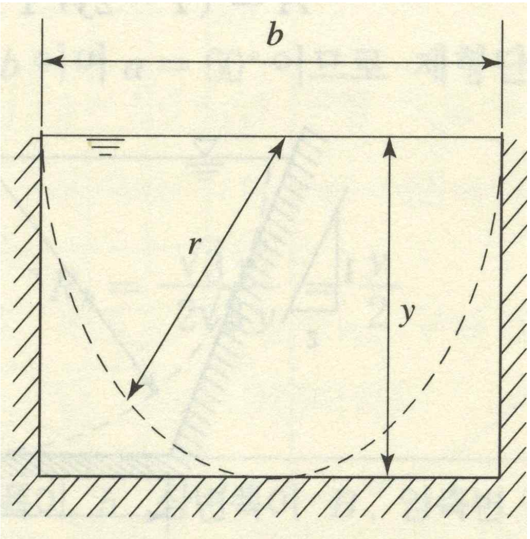
* 수로 단면적, 조도, 수로경사가 주어지면 경심(R)이 클수록 유량(Q)이 커진다.

◎ 수리상 유리한 단면이 될 조건

$$Q = VA = C\sqrt{RI}A = C\sqrt{I}\sqrt{\frac{A^3}{P}}$$

경심(R)이 최대치이거나 윤변(P)이 최소.

A. 직사각형 단면수로의 수리상 유리한 단면 조건



윤변 $P = b + 2y$

$$= \frac{A}{y} + 2y$$

$\frac{\partial P}{\partial y}=0$ 를 만족 시켜야 되므로

$$\therefore \frac{\partial P}{\partial y}=\frac{\partial}{\partial y}(b+2y)$$

$$=\frac{\partial}{\partial y}(\frac{A}{y}+2y)$$

$$=-\frac{A}{y^2}+2$$

$$=0$$

$$\therefore \frac{A}{y^2}=2 \quad \therefore y=\sqrt{\frac{A}{2}}$$

다시 $y=\sqrt{\frac{by}{2}}$

$$y^2=\frac{by}{2}$$

$$\therefore b=2y$$

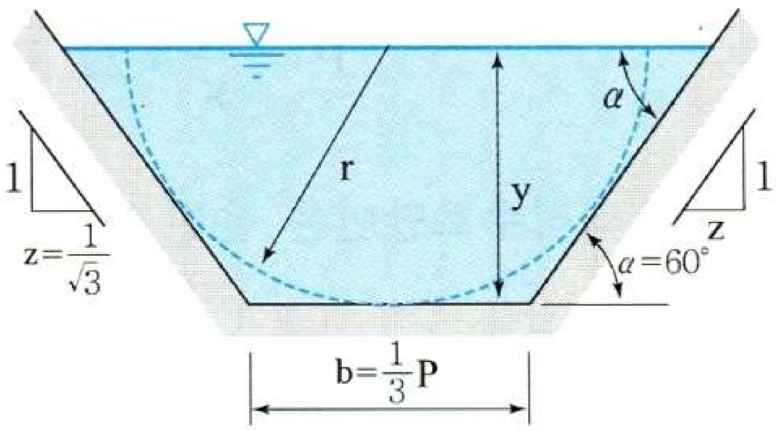
$$R=\frac{A}{P}$$

$$=\frac{by}{b+2y}=\frac{(2y)y}{2y+2y}$$

$$=\frac{y}{2}$$

$$\therefore R=\frac{y}{2}$$

B. 사다리꼴 단면 수로의 수리상 유리한 단면 조건



$$A=(b+zy)y=by+zy^2$$

$$P=b+2y\sqrt{1+z^2}$$

$$b=P-2y\sqrt{1+z^2}$$

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

A가 일정할 때 z를 상수로 보고 y에 관해 미분하면

$$\frac{dA}{dy}=(\frac{dP}{dy}-2\sqrt{1+z^2})y+(P-2y\sqrt{1+z^2})+2zy=0$$

$$P=4y\sqrt{1+z^2}-2zy$$

P를 최소로하는 z를 구하기 위해 위식에서 y를 상수로 보고 z에 관해 미분하여 $\frac{dP}{dz}=0$ 으로 놓으면

$$\frac{dP}{dz}=\frac{4zy}{\sqrt{1+z^2}}-2y=0$$

$$z=\frac{1}{\sqrt{3}},\ \alpha=60^o$$

수리적 최적단면의 제원을 수심 y의 항으로 표시하면

$$P=2\sqrt{3y},\ b=\frac{2\sqrt{3}}{3}y,\ A=\sqrt{3}y^2$$

이때의 동수반경(경심)은

$$R=\frac{A}{P}=\frac{\sqrt{3}y^2}{2\sqrt{3}y}=\frac{y}{2} \qquad \therefore R=\frac{y}{2}$$

예제 5.6 사다리꼴 단면 수로의 경사가 0.0001이고 조도계수가 0.022인 수로에서

a) 유량이 $10m^3/\sec$ 일 때 **최적단면(수리상 유리한 단면)을 설계**하라.

b) 저면폭 $b=5m$로하고 $z=1.5$로 하고자 할 때 수심을 구하고 이 경우 유량을 계산하라.

(풀이)

a) $Q=A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}$

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

$$y^{8/3}=20.6,\quad y=3.09m$$

$$b=\frac{2\sqrt{3}}{3}\times 3.09=3.57m$$

$$z=\frac{1}{\sqrt{3}}=0.577$$

b) $P=4y\sqrt{1+z^2}-2zy$

$$b+2y\sqrt{1+z^2}=4y\sqrt{1+z^2}-2zy$$

따라서 $b=5,\ z=1.5$를 대입하면 $y=8.26m$

통수단면 제원을 계산하면

$$A=by+zy^2=5\times 8.26+1.5\times 8.26^2=143.64m^2$$

$$P=b+2y\sqrt{1+z^2}=5+2\times 8.26\times\sqrt{1+1.5^2}=34.78m$$

$$R=\frac{A}{P}=\frac{143.64}{34.78}=4.13m$$

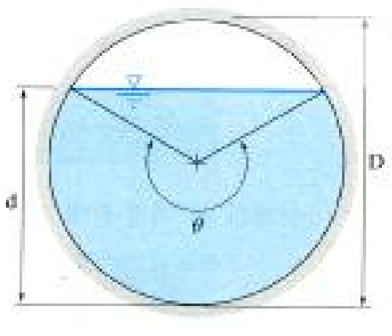
Manning 공식에 의한 유량은

$$Q=A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}=143.64\times(\frac{1}{0.022})\times 4.13^{2/3}\times 0.0001^{1/2}=168.07m^3/\sec$$

<수리특성곡선>(hydraulic characteristic curve)

폐합관거에서 만수시의 수리요소$(Q_F,\ V_F)$와 임의 수심에서의 수리요소$(Q,\ V)$와의 비율을 도시한 곡선을 **수리특성곡선**이라 한다. 이 곡선은 단면설계에 이용된다.

다음은 **원형관**의 경우 수리특선곡선을 그린 것이다.



통수단면과 윤변은 다음과 같다.

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \times \frac{\theta}{2\pi} + \frac{D}{2} sin(\frac{2\pi - \theta}{2}) \frac{D}{2} cos(\frac{2\pi - \theta}{2})$$
$$= \frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta)$$

$$P = \frac{D}{2}\theta$$

따라서 동수반경은

$$R = \frac{A}{P} = \frac{D}{4}(\frac{\theta - \sin\theta}{\theta})$$

Manning 공식으로 유량을 나타내면

$$Q = \frac{1}{n}[\frac{D^2}{8}(\theta - \sin\theta)][\frac{D}{4}(\frac{\theta - \sin\theta}{\theta}]^{2/3} I_0^{1/2}$$
$$= K\frac{D^{8/3}}{8 \times 4^{2/3}}[\frac{(\theta - \sin\theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}}]$$

여기서 $K = I_0^{1/2}/n$이고 관거내에 물이 가득차서 흐를 경우$(\theta = 2\pi)$의 유량 Q_F는

$$Q_F = \frac{KD^{8/3}}{8 \times 4^{2/3}}$$

따라서

$$\frac{Q}{Q_F} = \frac{1}{\pi}[\frac{(\theta - \sin\theta)^{5/3}}{\theta^{2/3}}]$$

최대유량 $Q_{\max}$가 되는 θ값을 구하면

$$\frac{dQ}{d\theta} = 0$$

$$\theta = 5.28rad = 303^0$$

따라서

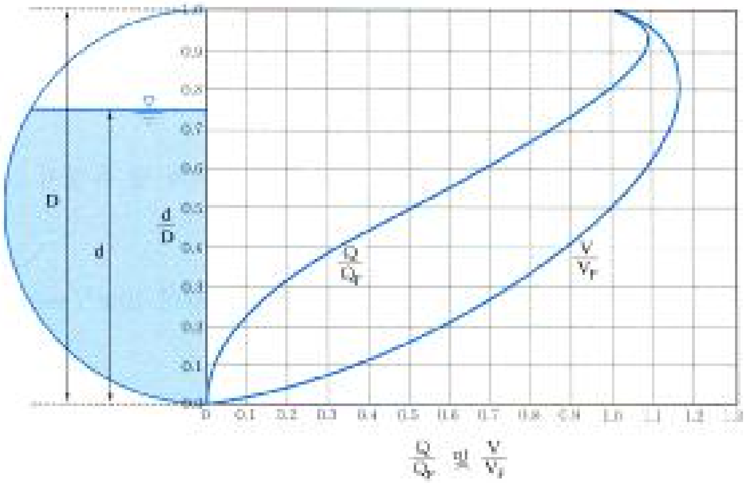
$$\frac{Q_{\max}}{Q_F} = 1.076, \quad \frac{d}{D} = 0.938$$

또 유속에 관해

$$\frac{V}{V_F} = (\frac{\theta - \sin\theta}{\theta})^{2/3}$$

그리고

$$\frac{V_{\max}}{V_F}=1.14,\quad \frac{d}{D}=0.81$$



예제 5.7 콘크리트관거의 직경이 1.2m이고 경사가 0.001일 때 최대로 흐르는 유량과 이때의 수심을 구하라. 단 관거의 조도계수는 0.014이다.

(풀이)

최대유량이 흐를 때 수심비가 $\frac{d}{D}=0.938$이므로

$$d=0.938\times1.2=1.126m$$

$$\cos\left(\frac{2\pi-\theta}{2}\right)=\frac{d-r}{r}=\frac{1.126-0.6}{0.6}=0.876$$

$$\cos^{-1}(0.876)=\frac{2\pi-\theta}{2}$$

$$\therefore\theta=5.28rad=303^{\circ}$$

$$A=\frac{D^2}{8}(\theta-\sin\theta)=\frac{1.2^2}{8}(5.28-\sin5.28)=1.102m^2$$

$$R=\frac{D}{4}\left(\frac{\theta-\sin\theta}{\theta}\right)=\frac{1.2}{4}\left(\frac{5.28-\sin5.28}{5.28}\right)=0.348m$$

따라서

$$Q=\frac{1}{0.014}\times1.102\times0.348^{2/3}\times0.001^{1/2}=1.232m^3/\sec$$

5.4 개수로 내의 흐름의 분류

1) 등류와 부등류

<흐름의 분류>

(1) 정류(steady flow) : $\frac{\partial v}{\partial t} = 0$

수로단면에서의 유속, 수심, 유량 등의 수리특성이 **시간**에 따라 변하지 않는 흐름.

· 등류(Uniform flow) : $\frac{\partial v}{\partial l} = 0, \ \frac{\partial v}{\partial t} = 0$

흐름구간의 **모든 단면**에서의 평균유속, 수심이 같다.
(단면과 경사가 같은 긴 수로에서 생김)

· 부등류(Nouniform flow or Varied flow) : $\frac{\partial v}{\partial l} \neq 0, \ \frac{\partial v}{\partial t} = 0$

경사나 단면형이 변하는 수로나 가속류가 배수(back water)가 생길 때의 흐름.

* 점변류(G.V.F): 상당한 구간의 흐름에 걸쳐 흐름 특성이 변하며 경계면에서의 마찰을 반드시 고려하여야 한다.

* 급변류(R.V.F): 흐름의 짧은 구간내에서 흐름 단면적에 큰 변화가 생기는 흐름.
소용돌이(vertex)로 인한 손실이 지배적이며 수로 단면의 급변시 발생

(2) 부정류(Unsteady flow) : $\frac{\partial v}{\partial t} \neq 0$

부정등류 - 극히 드묾
부정부등류 - 점변부정부등류
급변부정부등류

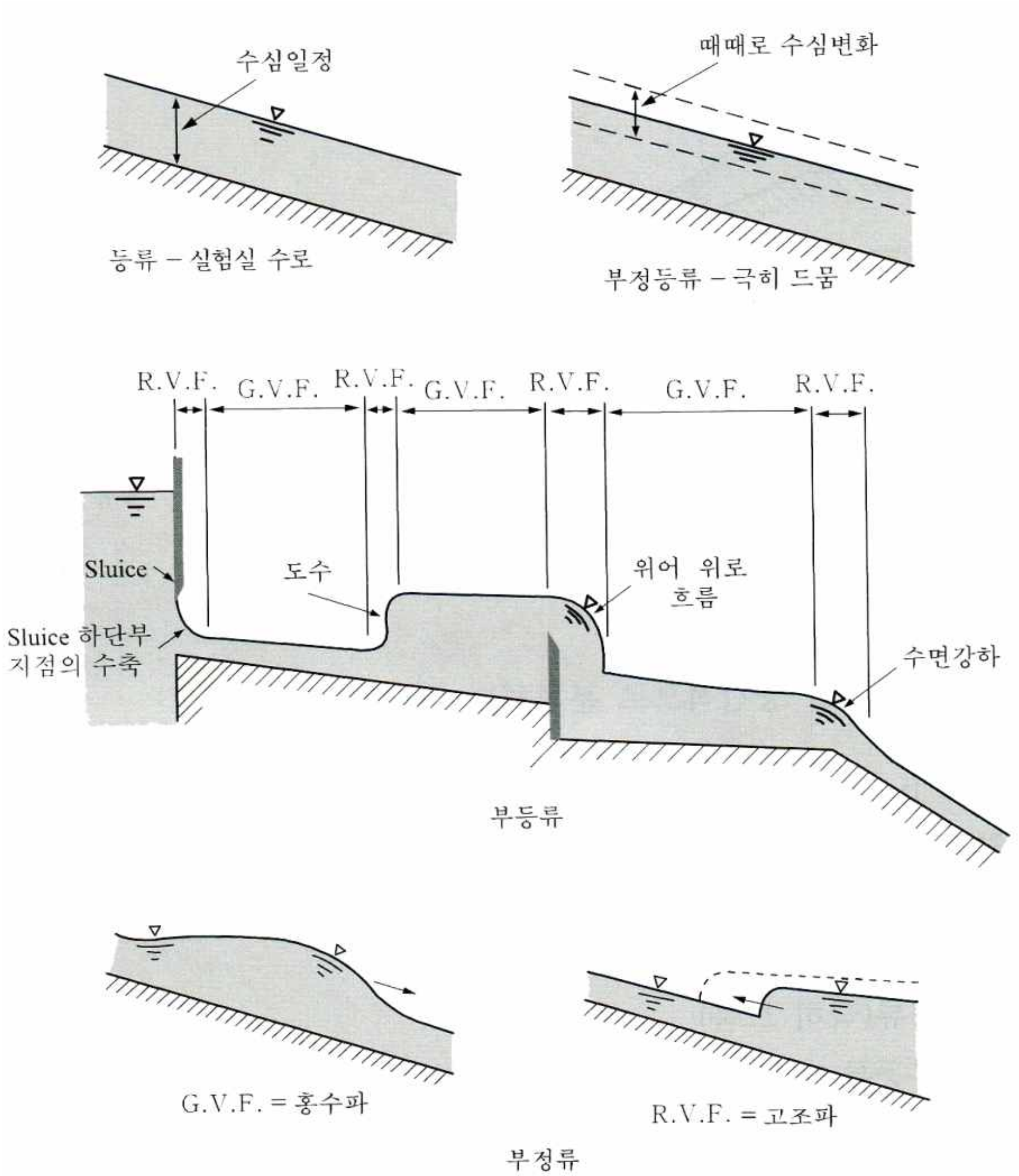
부정부등류를 일반적으로 부정류라 부른다.

(3) 상류 와 사류 Froude 수 : $F_r = \frac{v}{\sqrt{gD}}$

상류(subcritical flow) : $F_r < 1$

한계류(critical flow) : $F_r = 1$

사류(supercritical flow) : $F_r > 1$



개수로 등류의 흐름에서 수로의 마찰력 또는 전단력은 흐름방향의 중력성분과 주변의 마찰력의 관계로부터 구하면 다음과 같다.

$$\sum F_x = 0$$

$$Pdx\tau_0 = Wsin\theta = wAdx \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta$$

$$\tau_0 = wRcos\theta \cdot \sin\theta$$

$\theta \simeq 0$ 일 때, $\cos\theta \simeq 1$이고, $\sin\theta \simeq i = I$

$$\tau_0 = wRI$$

또한 **마찰속도** $u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}}$ 로부터

$$u_* = \sqrt{gRI}$$

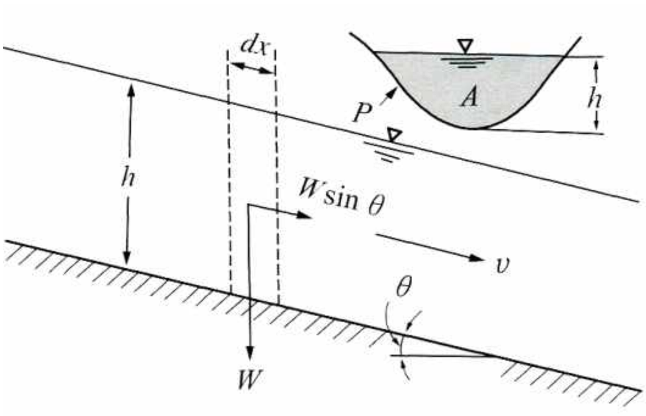
또

$$\tau_0 Pdx = Wsin\theta = WI$$

$$I = \frac{\tau_0 Pdx}{W} = \frac{\tau_0 A}{W} = \frac{F}{W}$$

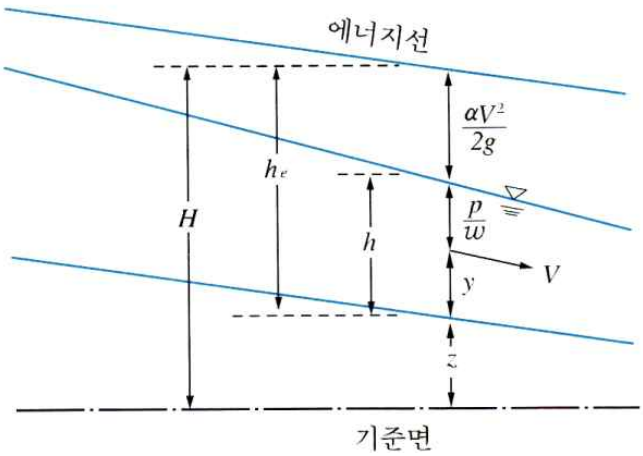
결국 단위무게당 마찰력은 에너지경사와 같다.

$$I = \frac{F}{W}$$



2) 비에너지와 상류 및 사류

< 비에너지(specific energy) : H_e>



$$H=(z+y)+\frac{p}{w}+\alpha\frac{V^2}{2g}$$

$H-z=H_e$라 하면

$$H_e=h+\alpha\frac{V^2}{2g} \quad (\text{비에너지 일반식})$$

여기서 H_e는 기준 수평면이 아닌 **수로바닥을 기준으로 측정된 에너지**이고 **비에너지**라 부른다.

연속방정식 $Q=AV$ 로부터

$$V=\frac{Q}{A}$$

$$H_e=h+\alpha\frac{V^2}{2g}$$

$$=h+\alpha\frac{Q^2}{2gA^2}$$

그런데 일반적으로 단면적은 다음식으로 표시할 수 있다.

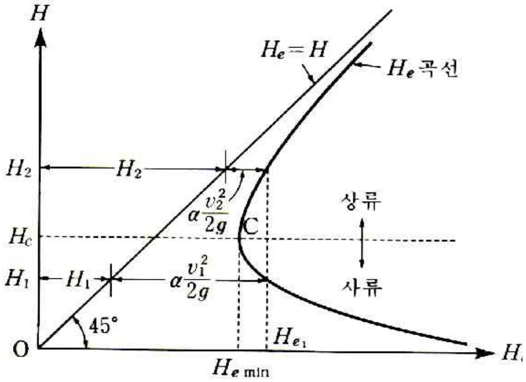
$$A = ah^n$$

* a, n은 단면형에 따라 변하는 상수이며 수심과는 상관없다.
비에너지의 일반식은

$$H_e = h + \alpha \frac{Q^2}{2ga^2h^{2n}}$$

* 유량(Q)이 일정하므로 비에너지(H_e)는 **수심(h)의 함수**이다.

<수심에 따른 비에너지의 변화>



$$H_e = h + \alpha \frac{Q^2}{2ga^2h^{2n}}$$

H_c : 한계수심

$H_{e\min}$: 최소에너지

H_{e1} : 임의 비에너지

임의 비에너지(H_{e1})는

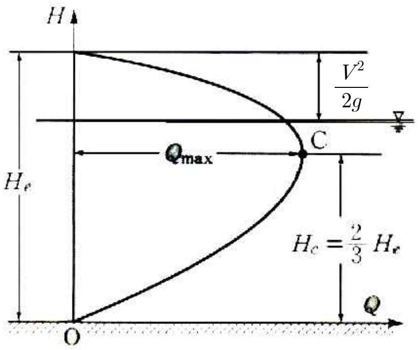
$$H_{e1} = H_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = H_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g}$$

그림에서 보듯이 최소비에너지에 대한 수심이며 1개가 존재하며 이 수심을 **한계수심 (critical depth)**이라 하고, 임의 비에너지에 대해 한계수심보다 큰 수심(H_2)과 작은 수심 (H_1) 2개의 수심이 존재하는데 이것을 **대응수심(altermate depth)**이라 한다.

< 수심에 따른 유량의 변화>

$$H_e = h + \alpha \frac{Q^2}{2ga^2h^{2n}} \text{로부터}$$

$$Q = \sqrt{\frac{2g}{\alpha}(He-h)a^2h^{2n}}$$



H_e는 일정하므로 유량은 수심의 변화에 따라 변한다.

① $H_e = H$ 일 때 $Q = 0$

② $H = 0$ 일 때 $Q = 0$

③ 한계수심(H_c)일 때 최대유량($Q_{\max}$)을 갖고

직사각형 단면수로($A = bh,\ a = b, n = 1,\ \alpha = 1$) 인 경우

$$Q = \sqrt{2g(He-h)b^2h^2}$$

최대유량이 될 조건은 $\frac{\partial Q}{\partial h} = 0$

$$\frac{\partial Q}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h}[\sqrt{2g(He-h_c)b^2h_c^2}]$$

$$\frac{\partial (Q^2)}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h}[2g(H_e - h_c)b^2h_c^2]$$

$$= \frac{\partial}{\partial h}[2gb^2(H_eh_c^2 - h_c^3)]$$

$$= 2gb^2(2H_eh_c - 3h_c^2) = 0$$

$$\therefore h_c = \frac{2}{3}H_e$$

<한계수심의 계산>

한계수심은 최소비에너지에 대한 수심이므로 비에너지가 최소가 될 조건은

$$\frac{\partial H_e}{\partial h} = 0$$

$$\frac{\partial H_e}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h}(h + \alpha \frac{Q^2}{2gA^2})$$

$$= 1 + \frac{\alpha Q^2}{2g} \frac{\partial}{\partial h}(\frac{1}{A^2})$$

$$= 1 + \frac{\alpha Q^2}{2g}(-\frac{2}{A^3})\frac{\partial A}{\partial h}$$

$$= 1 - \frac{\alpha Q^2}{gA^3}\frac{\partial A}{\partial h} = 0$$

$$\therefore \frac{\partial A}{\partial h} = \frac{gA^3}{\alpha Q^2}$$ (한계수심을 구하는 일반식)

이 식을 만족시키는 수심이 한계수심이며 **단면적**이 결정되면 구할 수 있다

수로단면이 $A = ah^n$인 일반적인 경우 한계수심을 구하면

$$\frac{\partial A}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h}(ah^n)$$

$$= nah^{n-1}$$

$$\frac{\partial A}{\partial h} = \frac{gA^3}{\alpha Q^2}$$

$$nah_c^{n-1} = \frac{gA_c^3}{\alpha Q^2}$$

$$= \frac{g(ah_c^n)^3}{\alpha Q^2}$$

양변을 ah^{n-1}으로 나누면

$$n = \frac{ga^2}{\alpha Q^2} h_c^{2n+1}$$

$$\therefore h_c = (\frac{n\alpha Q^2}{ga^2})^{\frac{1}{2n+1}}$$

① **직사각형 단면수로의 한계수심**

직사각형 단면의 경우 $A = BH$이니까 $A = aH^n$과 비교하면 $a = B,\ n = 1$이므로

$$H_c = \left(\frac{\alpha Q^2}{gB^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

(별해)

$$\frac{\partial A}{\partial h} = \frac{gA^3}{\alpha Q^2}$$

$$A_c = BH_c, \quad \frac{\partial A}{\partial H} = B$$

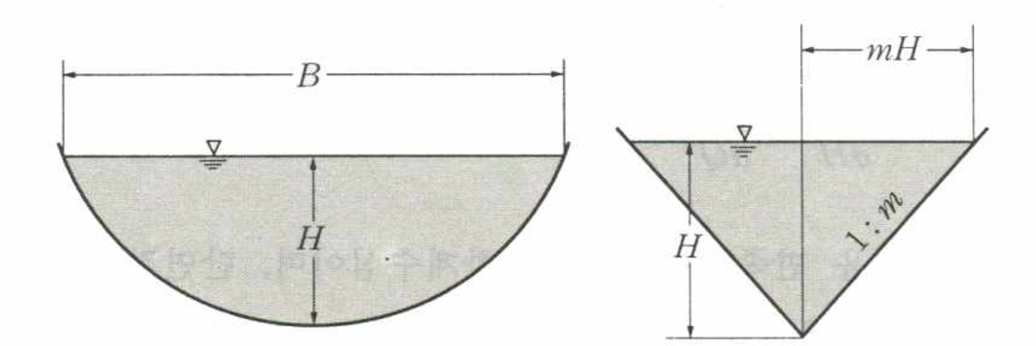
$$B = \frac{g(BH_c)^3}{\alpha Q^2}$$

$$\therefore H_c = \left(\frac{\alpha Q^2}{gB^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

② 포물선 단면수로의 한계수심

$A = BH^{\frac{3}{2}}$ 이므로 $a = B, \ n = \dfrac{3}{2}$ 를 한계수심 일반식에 대입하면

$$H_c = \left(\frac{1.5\alpha Q^2}{gB^2}\right)^{\frac{1}{4}}$$

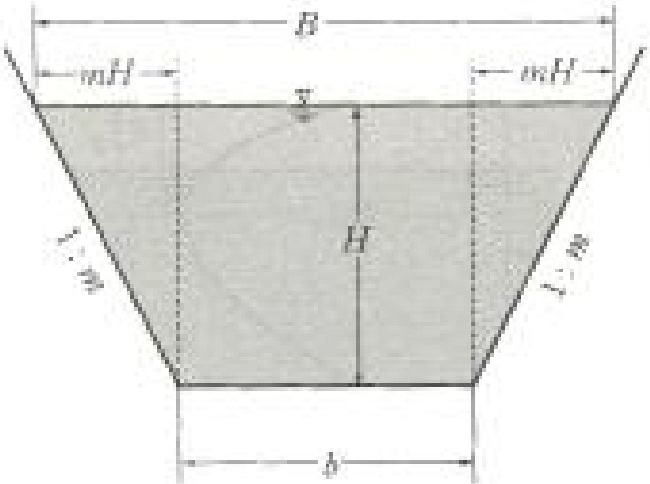


③ 삼각형 단면수로의 한계수심

$A = mH^2$ 이므로 $a = m, \ n = 2$

$$H_c = \left(\frac{2\alpha Q^2}{gm^2}\right)^{\frac{1}{5}}$$

④ 사리꼴 단면수로의 한계수심



$$A = bH + mH^2$$

$$\frac{dA}{dH} = b + 2mH = B$$

$$\frac{dA}{dH} = B$$

$\alpha = 1,\ V = \dfrac{Q}{A}$ 를 비에너지식에 대입하면

$$H_e = H + \alpha\frac{V^2}{2g} = H + \frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{A}\right)^2$$

$$\frac{dH_e}{dH} = 1 - \frac{Q^2}{gA^3}\frac{dA}{dH} = 0$$

$$\frac{Q^2}{gA^3}\frac{dA}{dH} = 1$$

$\dfrac{dA}{dH} = B$ 를 대입하면

$$\frac{Q^2 B}{g A^3} = 1$$

$H = H_c$로 놓으면

$$B = b + 2mH_c, \;\; A = H_c(b + mH_c)$$

$$\frac{Q^2 B}{g A^3} = \frac{Q^2(b + 2mH_c)}{g(bH_c + mH_c^2)^3} = 1$$

$$H_c(b + mH_c) = \sqrt[3]{Q^2(b + 2mH_c)} \, / \, \sqrt[3]{g}$$

$$\therefore H_c = \frac{\sqrt[3]{(b + 2mH_c)}}{(b + mH_c)} \sqrt[3]{\frac{Q^2}{g}}$$

예제 5.8 직사각형 수로의 폭 $B = 4m$에 유량이 $Q = 3m^3/\sec$의 물을 유하 시킬 때 한계 수심을 구하라. 단 $\alpha = 1.1$이다.

(풀이) $H_c = (\frac{\alpha Q^2}{gB^2})^{\frac{1}{3}}$

$$H_c = (\frac{1.1 \times 3^2}{9.8 \times 4^2})^{\frac{1}{3}} = 0.399m$$

예제 5.9 수로폭이 $6m$인 직사각형 수로에 유량 $8m^3/\sec$의 물이 $65cm$의 수심으로 흐를 때 비에너지를 구하고 흐름이 상류인지 사류인지 판단하라. 단 $\alpha = 1.0$이다.

(풀이) $V = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{BH} = \frac{8}{6 \times 0.65} = 2.05m/\sec$

$$H_e = H + \alpha \frac{V^2}{2g} = 0.65 + 1.0 \times \frac{(2.05)^2}{2 \times 9.8} = 0.864m$$

$$H_c = (\frac{\alpha Q^2}{gB^2})^{\frac{1}{3}} = (\frac{1.0 \times 8^2}{9.8 \times 6^2})^{\frac{1}{3}} = 0.565m$$

$H = 0.65 > H_c = 0.565$ $\therefore$ 상류

최소 비에너지 $H_{e\min} = \frac{3}{2} H_c = 1.5 \times 0.565 = 0.85m$

$$V_c = \sqrt{gH_c} = \sqrt{9.8 \times 0.565} = 2.35m/\sec$$

예제 5.10 제형(사다리꼴) 단면 수로에 $15m^3/\mathrm{sec}$의 물이 흐르고 있다. 수로 저변 폭이 $10m$이고, 측벽 경사가 1:1 (45^0)일 때 한계수심, 한계유속 및 최소 비에너지를 구하라

(풀이) 한계류 조건식 : $\dfrac{QB_c}{gA_c^3}=1$ 또는 $\dfrac{A_c^3}{B_c}=\dfrac{Q^2}{g}$

$$A_c=y_c(b+zy_c)=by_c+zy_c^2=10y_c+y_c^2$$

$$B_c=\frac{dA_c}{dy_c}=\frac{d(by_c+zy_c^2)}{dy_c}=b+2zy_c=10+2y_c$$

따라서

$$\frac{(10y_c+y_c^2)^3}{(10+2y_c)}=\frac{15^2}{9.81}$$

시산법으로 풀면 $y_c=0.60m$

$$V_c=\frac{Q}{A_c}=\frac{15}{10\times0.6+0.6^2}=2.36m/\mathrm{sec}$$

$$H_{e\min}=y_c+\frac{V_c^2}{2g}=0.6+\frac{2.36^2}{2\times9.81}=0.88m$$

<상류(常流-Subcritical flow)와 사류(射流-Supercritical flow)의 특성>

$*$ **한계유속(critical velocity)** : V_c

한계수심으로 흐르는 수로 속의 유속

직사각형 단면수로의 경우 한계유속을 구하여 보면

연속방정식은

$$Q=AV$$

$$=bh_cV_c$$

이것을 한계 수심에 대입하면

$$h_c=\left(\frac{\alpha Q^2}{gb^2}\right)^{1/3}$$

$$=\left(\frac{\alpha b^2h_c^2V_c^2}{gb^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

양변을 3승하면

$$h_c^3 = \frac{\alpha b^2 h_c^2 V_c^2}{g b^2}$$

$$\therefore V_c = \sqrt{\frac{g h_c}{\alpha}}$$

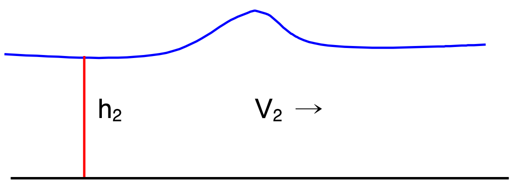
$\alpha = 1$라면

$$V_c = \sqrt{g h_c} \qquad \text{(한계수심으로 흐를 때의 유속)}$$

* 상류(常流)의 물리적 특성

장파(長波)의 전파속도 $C = \sqrt{gh}$ 라 하면

$\leftarrow C = \sqrt{g h_2}$



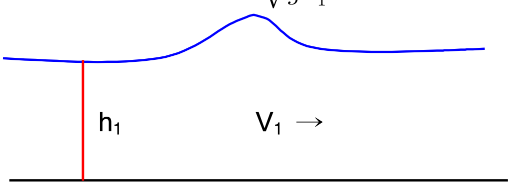
① h_2 : 상류(常流) 수심

② $h_2 > h_c$, $V_2 < \sqrt{g h_2}$

③ $V_2 = \sqrt{g h_2}$ 의 속도로 上流로 전파된다

* 사류(射流)의 특성

$\rightarrow C = \sqrt{g h_1}$



① h_1 : 사류(射流) 수심

② $h_1 < h_c$, $V_1 > \sqrt{g h_1}$

③ $V_1 = \sqrt{g h_1}$ 의 속도로 언제나 下流로 전파된다

* 후르드 수(Froude Number) : F_r

수로 속의 유속(V)과 장파의 전파속도($C = \sqrt{gh}$)의 비로서 나타내며 常流와 射流를 구별하는 무차원량이다.

$$F_r = \frac{V}{\sqrt{gh}}$$

$F_r < 1$: 상류
$F_r = 1$: 한계류
$F_r > 1$: 사류

<한계경사(critical slope) : I_c>

등단면 수로를 常流로 흐르는 경우 수로경사가 어느 한계치에 도달하면 수심은 한계수심이 되고 흐름은 常流에서 射流로 변한다. 즉, 등류수심이 한계수심과 같게 되었을 때의 수로경사를 말한다. 또 이때의 수로단면을 **지배단면(control section)**이라 한다.

직사각형 단면수로의 경우 한계경사를 구하여 보면
연속방정식은

$$Q = AV$$

$$= bh \cdot C\sqrt{RI}$$

$$= bh \cdot C\sqrt{hI}$$

양변을 제곱하면

$$Q^2 = b^2h^2 \cdot C^2hI$$

$$\therefore\ h = \left(\frac{Q^2}{b^2C^2I}\right)^{\frac{1}{3}}$$

그런데

$h_c = h$ 일 때 한계류가 되고 이때 경사는 한계경사 I_c가 된다.

$$h_c = \left(\frac{\alpha Q^2}{gb^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\left(\frac{\alpha Q^2}{gb^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{Q^2}{b^2C^2I_c}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$\alpha Q^2b^2C^2I_c = Q^2gb^2$$

$$I_c = \frac{g}{\alpha C^2} \quad : \text{한계류}$$

$$\therefore\ I < I_c \quad : \text{상류}$$

$$I > I_c \quad : \text{사류}$$

* $C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{n}h^{\frac{1}{6}}$ 이므로 조도계수가 커질수록 한계경사도 커진다.

그리고 **관수로**에서 한계 레이놀즈 수 R_{ec}는

$$R_{ec} = \frac{VD}{\nu} = 2000$$

그런데 **개수로**에서 한계 레이놀즈 수 R_{ec}는

$$R = \frac{D}{4}$$

$$\therefore\ D = 4R$$

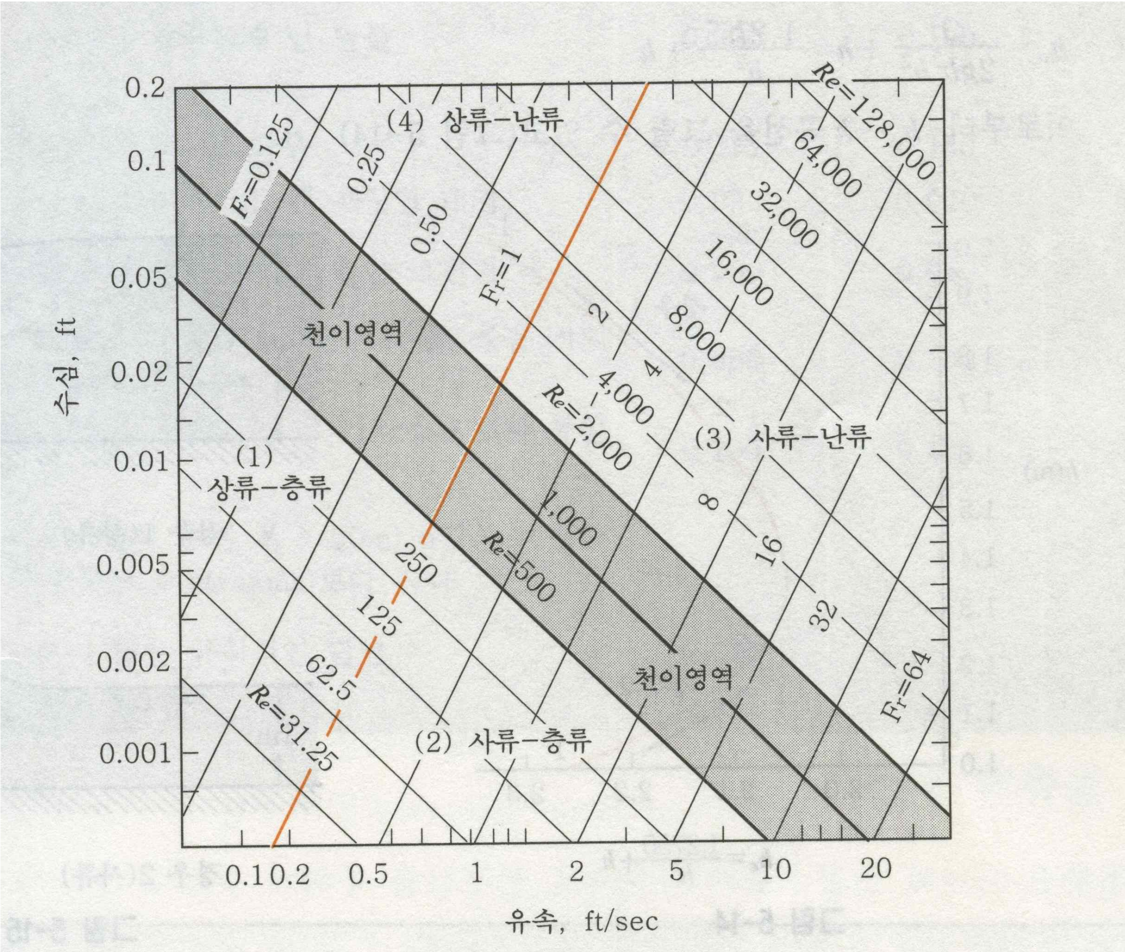
$$\therefore\ R_e = \frac{V(4R)}{\nu} = 2000$$

$$R_{ec} = \frac{VR}{\nu} = 500$$

$\therefore$ $R_{ec} = 500$: 개수로의 한계류

$R_e < 500$: 층류

$R_e > 500$: 난류



(1) : 층류인 동시에 常流의 흐름
(2) : 난류인 동시에 常流의 흐름
(3) : 난류인 동시에 射流의 흐름
(4) : 층류인 동시에 射流의 흐름
※ 개수로 속의 흐름은 층류, 난류, 常流, 射流가 조합된 흐름이다.

예제 5.11 수로폭 5m, 조도계수 0.025, 경사 1/1600의 직사각형 수로에 유량이 $5m^3/\mathrm{sec}$의 물이 흐르고 있을 때 이 흐름이 상류인지 사류인지 판별하고 한계수심, 한계유속, 한계경사

를 구하라.

(풀이) 등류수심을 구하면

$$Q = A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2} = BH\frac{1}{n}\left(\frac{BH}{B+2H}\right)^{\frac{2}{3}}I_0^{\frac{1}{2}}$$

$$5 = 5H\times\frac{1}{0.025}\left(\frac{5H}{5+2H}\right)^{\frac{2}{3}}\left(\frac{1}{1600}\right)^{\frac{1}{2}}$$

시산법으로 $H = 1.17m$

$$V = \frac{Q}{BH} = \frac{5}{5\times1.17} = 0.85m/\sec$$

$$\therefore H_c = \left(\frac{\alpha Q^2}{gB^2}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{1.0\times5^2}{9.8\times5^5}\right)^{\frac{1}{3}} = 0.47m$$

$$V_c = \frac{Q}{BH_c} = \frac{5}{5\times0.47} = 2.127m/\sec$$

$$R_c = \frac{BH_c}{B+2H_c} = \frac{5\times0.47}{5+2\times0.47} = 0.3956m$$

$$Q = BH_c\frac{1}{n}R_c^{2/3}I_c^{1/2}$$

$$5 = 5\times0.47\times\frac{1}{0.025}\times0.3956^{\frac{2}{3}}\times I_c^{\frac{1}{2}}$$

$$\therefore I_c = 0.008$$

(별해) $B \ggg 10H$인 경우

$$C = \frac{1}{n}R^{\frac{1}{6}} = \frac{1}{0.025}\times0.3956^{\frac{1}{6}} = 34.27$$

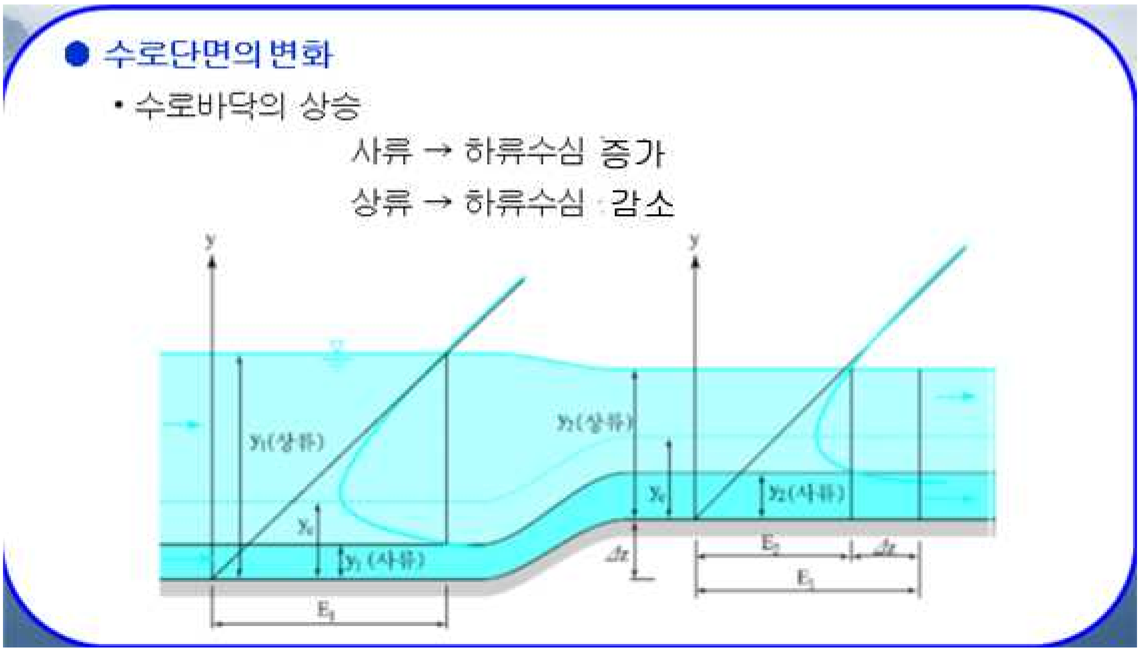
$$I_c = \frac{g}{\alpha C^2} = \frac{9.8}{1\times34.27^2} = 0.0083$$

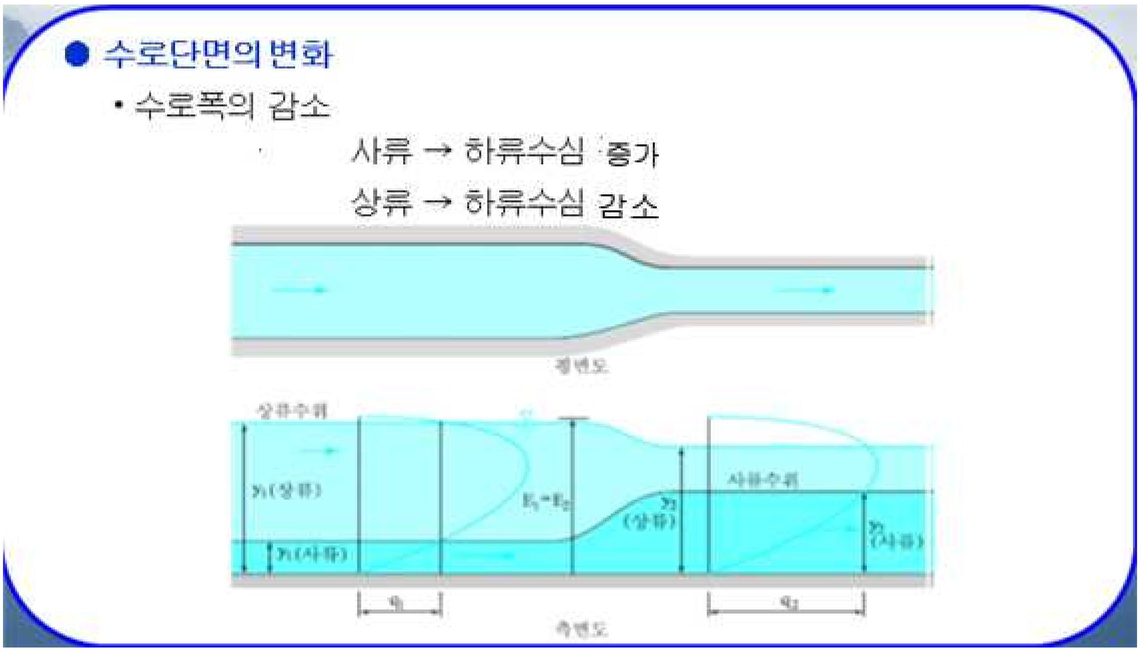
위의 풀이로부터 흐름를 판단하면

$H > H_c,\quad V < V_c,\quad I_0 < I_c \quad \therefore$ 상류

(별해) $F_r = \dfrac{V}{\sqrt{gH}} = \dfrac{0.85}{\sqrt{9.8 \times 1.17}} = 0.25$

$F_r < 1,\ \therefore$ 상류





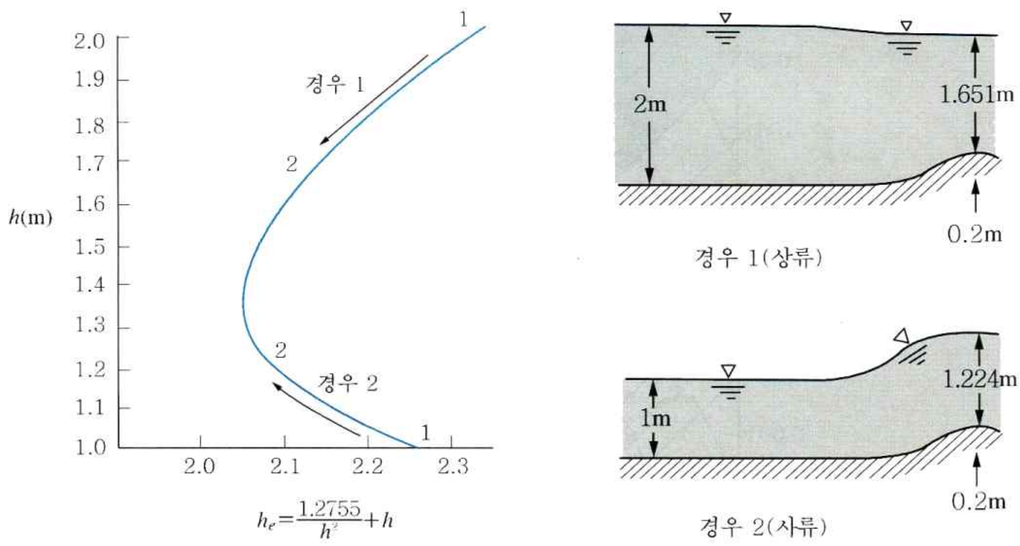
예제 5.12 수로폭이 1m인 직사각형 수로에 유량 5$m^3/\sec$의 물이 흐를 때 수로 바닥에 흐름방향에 직각으로 높이 $\delta = 0.2m$되는 장애물이 물에 잠긴채 놓여 있다. 다음 두 경우에 대하여 장애물로 인한 수심의 증감을 구하라.

(1) $h_1 = 2m, \delta = 0.2m$

(2) $h_1 = 1m,\ \delta = 0.2m$

(풀이)

$$H_e = \frac{Q^2}{2gb^2h^2} + h = \frac{5^2}{2 \times 9.8 \times 1^2 \times h^2} + h = \frac{1.2755}{h^2} + h$$



한계수심 $H_c = \sqrt[3]{\frac{Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{5^2}{9.8 \times 1^2}} = 1.366m$

그러므로 CASE(!)은 상류이고, CASE(2)는 사류이다.

CASE(!) : $H_{e1} = H_{e2} + \delta$

$$\frac{1.2755}{h_1^2} + h_1 = \frac{1.2755}{h_2^2} + h_2 + \delta$$

$$\frac{1.2755}{2^2} + 2 = \frac{1.2755}{h_2^2} + h_2 + 0.2$$

$$2.1189 = \frac{1.2755}{h_2^2} + h_2$$

$$\therefore h_2 = 1.651m$$

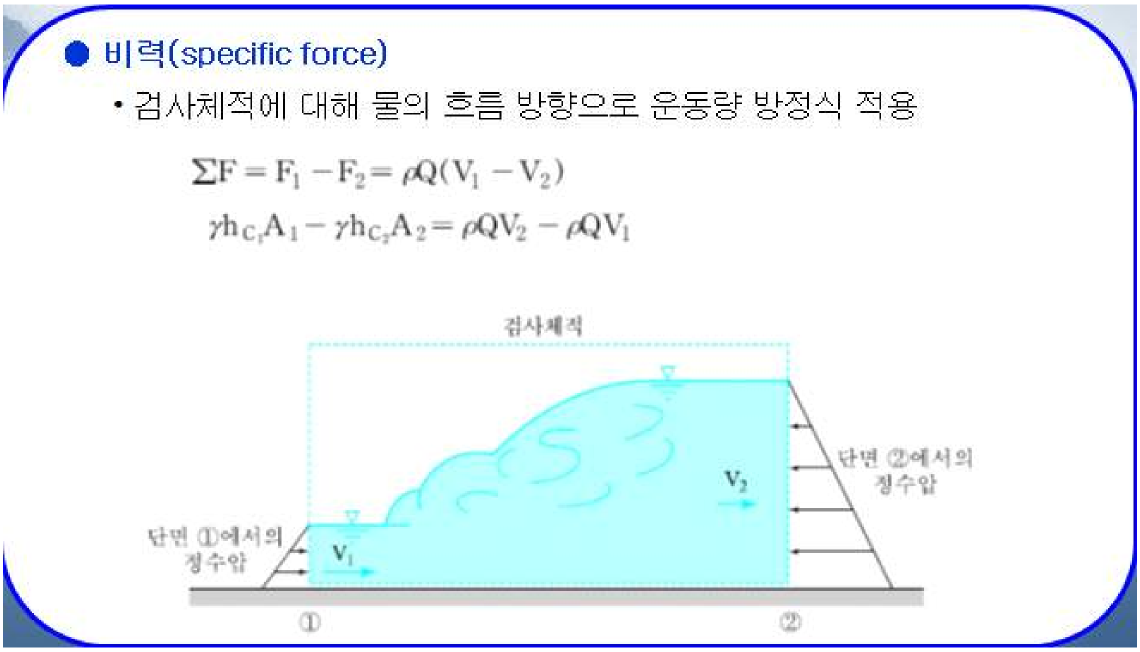
CASE(2) : 위와 같은 방법으로

$$2.0755 = \frac{1.2755}{h_2^2} + h_2$$

$$\therefore h_2 = 1.224m$$

5.5 비력과 도수해석

1) 비력

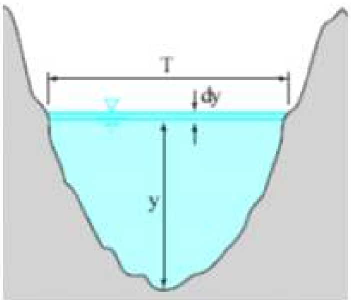


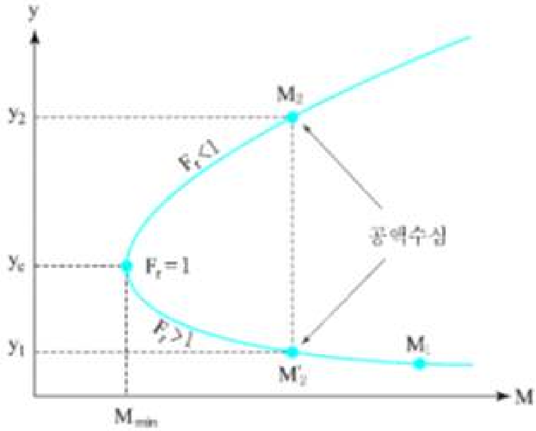
● 비력(specific force)

• 각 단면의 항으로 정리하고 단위중량 γ로 나누면

$$h_{C_1}A_1 + \frac{QV_1}{g} = h_{C_2}A_2 + \frac{QV_2}{g} \quad \text{또는} \quad h_{C_1}A_1 + \frac{Q^2}{gA_1} = h_{C_2}A_2 + \frac{Q^2}{gA_2}$$

$$M = h_C A + \frac{Q^2}{gA}$$





● 비력(specific force)

• 비력이 최소가 되는 조건

$$\frac{dM}{dy} = \frac{d}{dy}(h_C \cdot A) - \frac{Q^2}{gA^2}\frac{dA}{dy} = 0$$

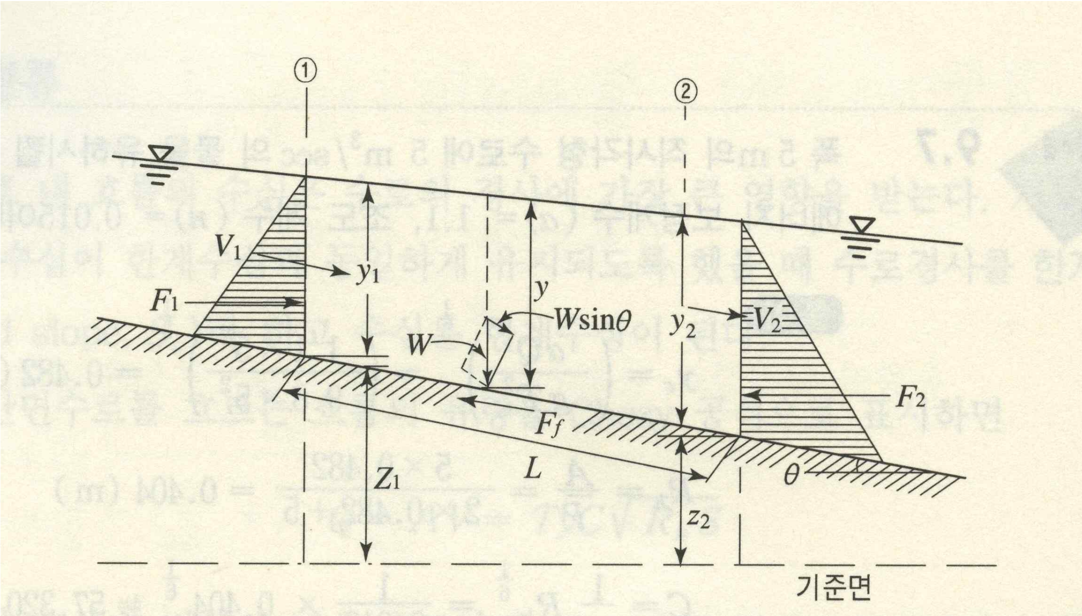
$$\frac{d(h_G \cdot A)}{dy} = \frac{\left[A(h_G + dy) + \frac{dy}{2} \cdot T \cdot dy\right] - h_G \cdot A}{dy} = \frac{A \cdot dy}{dy} = A$$

$$\frac{dM}{dy} = A - \frac{Q^2}{gA^2}\frac{dA}{dy} = 0$$

$$\frac{Q^2 T}{gA^3} = 1$$

☞ 비력이 최소가 되는 조건은 F_r=1인 한계류인 경우이고,
이때의 수심이 한계수심 y_c임

<비력 or 충력치(specific force or special force): M>



①, ② 단면 사이에 운동량 방정식을 적용하면

$$\sum F = \eta \frac{\omega_0}{g} Q(v_1 - v_2) \text{ --- ①}$$

또 ①, ② 단면 사이의 힘의 평형을 생각하면

$$\sum F = P_1 + W sin\theta - P_2 - \tau \text{ --- ②}$$

②식과 ①식은 같으므로

$$P_1 + W sin\theta - P_2 - \tau = \eta \frac{\omega_0}{g} Q(v_2 - v_1)$$

여기서 θ가 작고 l 이 짧다면 $W sin\theta$와 τ는 무시할 수 있다.

$$\therefore \ P_1 - P_2 = \eta \frac{\omega_0}{g} Q v_2 - \eta \frac{\omega_0}{g} Q v_1$$

$$P = w_0 h_G A$$

$$w_0 h_{G1} A_1 - w_0 h_{G2} A_2 = \eta \frac{\omega_0}{g} Q v_2 - \eta \frac{\omega_0}{g} Q v_1$$

정리하면

$$\eta \frac{Q}{g} v_1 + h_{G1} A_1 = \eta \frac{Q}{g} v_2 + h_{G2} A_2$$

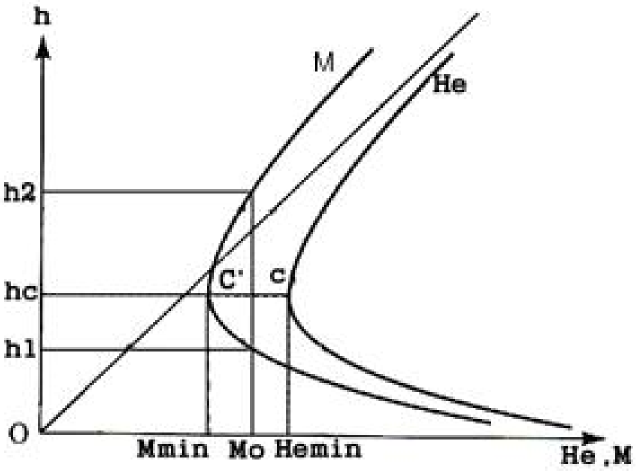
일반적으로

$$M = \eta \frac{Q}{g} v + h_G A = \text{cost}.$$ (충력치 일반씩)

$$M = \eta \frac{Q^2}{gA} + h_G A$$

* 충력치(M)는 A도 수심의 함수, h_G도 수심의 함수이므로 수심의 함수이다.

그래서 수심 h에 따른 충력치 M 의 변화를 도시하면 아래 그림과 같다.



충력치 M 이 최소가 되는 조건식은 $\frac{\partial M}{\partial h} = 0$ 이므로

$$\frac{\partial M}{\partial h} = \frac{\partial}{\partial h}(\eta \frac{Q^2}{gA} + h_G A)$$

$$= \frac{\partial}{\partial h}(\eta \frac{Q^2}{gbh} + \frac{2}{h} bh)$$

$$= \frac{\partial}{\partial h}(\eta \frac{Q^2}{gbh} + \frac{1}{2} bh^2)$$

$$= -\frac{\eta Q^2}{gb}(\frac{1}{h^2}) + bh$$

$$= -\frac{\eta Q^2}{gbh^2} + bh = 0$$

$$\frac{\eta Q^2}{gbh^2} = bh$$

$$gb^2 h^3 = \eta Q^2$$

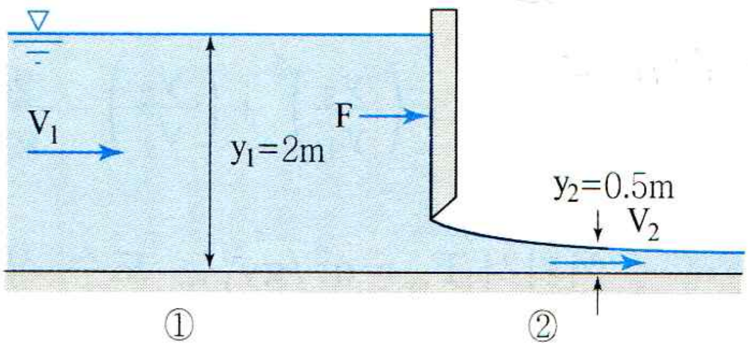
$$\therefore h = (\frac{\eta Q^2}{gb^2})^{\frac{1}{3}}$$

그런데 한계수심 $H_c = (\frac{\alpha Q^2}{gB^2})^{\frac{1}{3}}$ 이므로

$\eta \fallingdotseq \alpha$ 이면 최소 충력치가 되는 수심은 근사적으로 한계수심과 같다.

* 임의의 충력치 M_0에 대한 수심은 h_1, h_2이며 두 수심의 관계를 **대응수심** 또는 공액수심(alternate depth or conjugate depth)이라 한다.

예제 5.13 그림과 같이 폭 5m의 사각형 단면 수로에 14$m^3/\sec$의 유량이 흐르고 있다. 수문 상류부의 수심이 2m이고 하류부의 수심이 2m일때 수문에 가해지는 힘을 구하라



(풀이) $\sum F_x = \frac{w_0 Q}{g}(V_2 - V_1)$

$$P_1 - P_2 - F = \frac{w_0 Q}{g}(V_2 - V_1)$$

$$F = w_0[(\frac{Q}{g}\frac{Q}{A_1} + h_{G1}A_1) - (\frac{Q}{g}\frac{Q}{A_2} + h_{G2}A_2)]$$

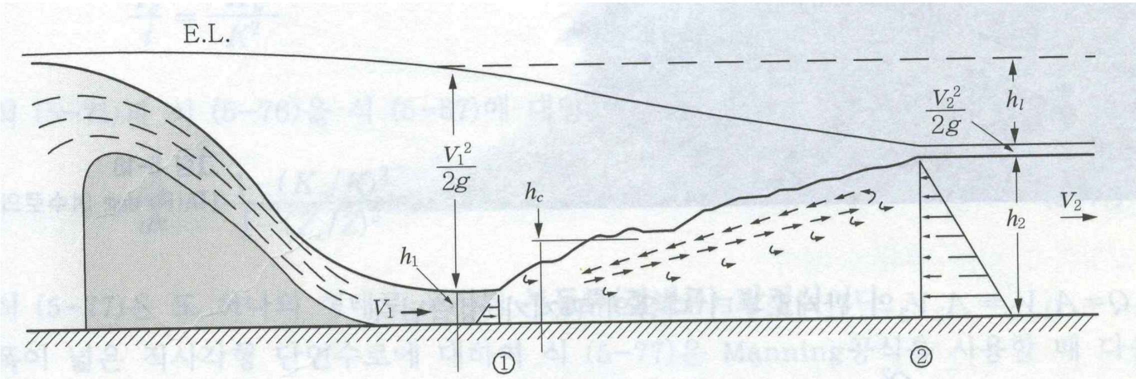
$$F = w_0[M_1 - M_2]$$

$$M_1 = h_{G1}A_1 + \frac{Q^2}{gA_1} = 1 \times 5 \times 2 + \frac{14^2}{9.81 \times 5 \times 2} = 12m^3$$

$$M_2 = h_{G2}A_2 + \frac{Q^2}{gA_2} = 0.25 \times 5 \times 0.5 + \frac{14^2}{9.81 \times 5 \times 0.5} = 8.62m^3$$

$$F = 1000(12 - 8.62) = 3380kg$$

2) 도수 현상



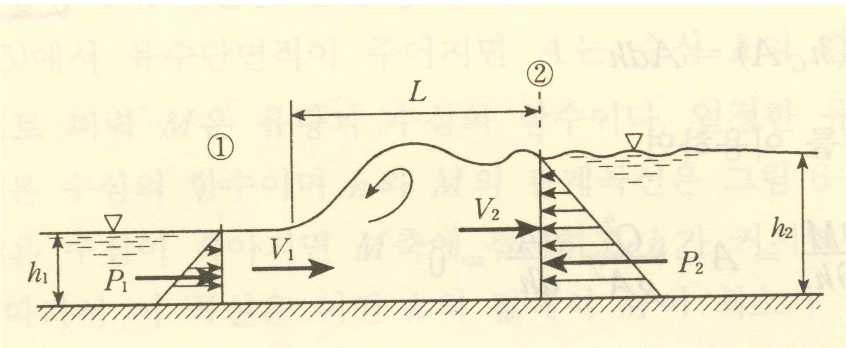
<도수의 해석>

흐름이 射流에서 常流로 변할 때 수면이 불규칙적으로 튀어오르는 현상을 **도수(跳水 : hydraulic jump)**라 한다.

ex) 여수로(spill way)의 하류부, 수문의 하류부

＊도수의 전후에는 에너지차가 생기므로 적당한 에너지를 소모시켜 도수전후의 에너지를 조절(감세목적)해야 한다.

직사각형 단면수로에서



①, ② 단면 사이에 운동량방정식과 힘의 평형을 생각하면

$$P_1 - P_2 - Wsin\theta - \tau \quad = \eta \frac{\omega_0}{g} Q(v_2 - v_1)$$

구간이 짧고 θ가 작다면 $Wsin\theta$, τ는 무시할 수 있으므로

$$P_1 - P_2 = \eta \frac{\omega_0}{g} Q(v_2 - v_1)$$ --- ①

$$P_1 + \eta \frac{\omega_0}{g} Qv_1 = P_2 + \eta \frac{\omega_0}{g} Qv_2$$

* 도수전후의 충력치는 같다.

①식에서 직사각형단면 정수압공식 $P = \frac{1}{2} w_0 bh^{\frac{1}{2}}, v = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{bh}$ 을 이용하면

$$\frac{1}{2}\omega_0 bh_1^2 - \frac{1}{2}\omega_0 bh_2^2 = \eta \frac{\omega_0}{g} Q(\frac{Q}{A_2} - \frac{Q}{A_1})$$

$$\frac{1}{2}h_1^2 - \frac{1}{2}h_2^2 = \eta \frac{Q^2}{gb}(\frac{1}{bh_2} - \frac{1}{bh_1})$$

여기서

$\eta = 1$이고 q가 단위폭당 유량이라면 $q = Q/b$

$$\frac{1}{2}h_1^2 - \frac{1}{2}h_2^2 = \frac{q^2}{g}(\frac{1}{h_2} - \frac{1}{h_1})$$

$$\frac{1}{2}(h_1^2 - h_2^2) = \frac{q^2}{g}(\frac{h_1 - h_2}{h_1 h_2})$$

$$\therefore h_1 h_2 (h_1^2 - h_2^2) = \frac{2q^2}{g}(h_1 - h_2)$$

$$h_1 h_2 (h_1 + h_2) = \frac{2q^2}{g}$$

양변을 h_1으로 나누어 정리하면

$$h_2^2 + h_1 h_2 - \frac{2q^2}{gh_1} = 0$$ = 0 --- ②

$$h_2 = \frac{-h_2 + \sqrt{h_1^2 + \frac{8q^2}{gh_1}}}{2}$$

$$h_2 = \frac{-h_1 + \sqrt{h_1^2 + \frac{8h_1^2 v_1^2}{gh_1}}}{2}$$

$$= \frac{-h_1 + \sqrt{h_1^2 + (1 + \frac{8v_1^2}{gh_1})}}{2}$$

그런데 　후르드 수 $F_r = \frac{v}{\sqrt{gh}}$ 로부터

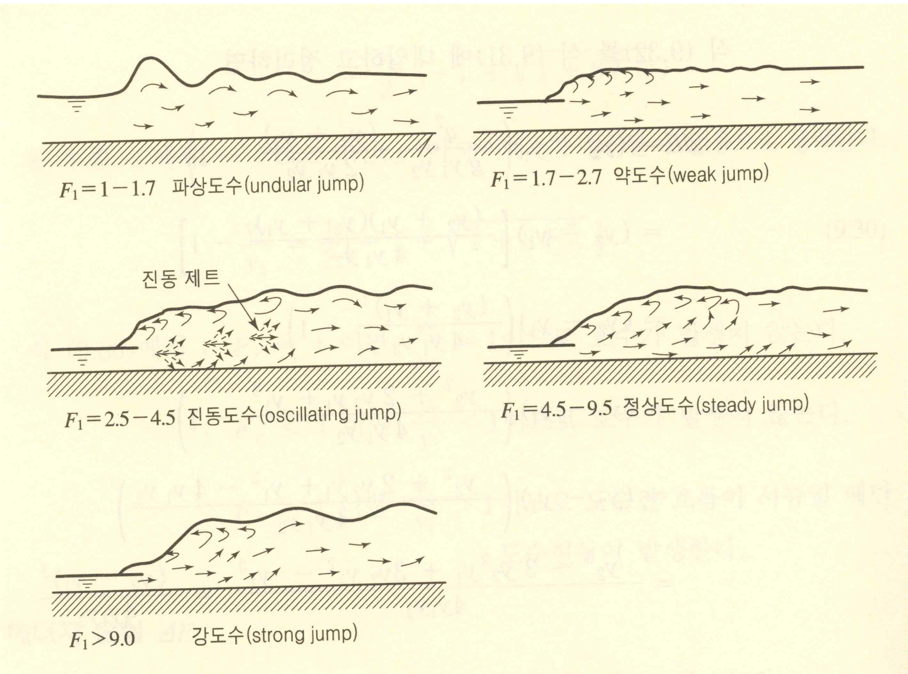
$$F_{r1} = \frac{v_1}{\sqrt{gh_1}} \text{ 이고}$$

$$h_2 = \frac{-h_1 + h_1\sqrt{1+8F_{r1}^2}}{2}$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1) \text{ 또는 } \frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1+8Fr_1^2}-1)$$

(도수후 상류수심을 구하는 공식)

< 도수의 종류>



$F_1 = 1-1.7$ 파상도수(undular jump)

$F_1 = 1.7-2.7$ 약도수(weak jump)

$F_1 = 2.5-4.5$ 진동도수(oscillating jump)

$F_1 = 4.5-9.5$ 정상도수(steady jump)

$F_1 > 9.0$ 강도수(strong jump)

<도수에 의한 에너지 손실 : $\triangle H_e$ >

- 도수전후의 에너지차로 수면에는 표면 소용돌이가 생기고 이 때문에 에너지가 소모된다.

직사각형 단면수로에서 에너지 손실은

$$\triangle H_e = (h_1 + \alpha\frac{v_1^2}{2g}) - (h_2 + \alpha\frac{v_2^2}{2g})$$

$$= (h_1 + \alpha\frac{Q^2}{2gA_1^2}) - (h_2 + \alpha\frac{Q^2}{2gA_2^2})$$

$$= (h_1 - h_2) + \frac{\alpha Q^2}{2g}(\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2})$$

$$= (h_1 - h_2) + \frac{\alpha Q^2}{2g}(\frac{1}{bh_1^2} - \frac{1}{bh_2^2})$$

여기서 $\alpha = 1$이고 q가 단위폭당 유량이라 하면 에너지 손실은

$$\triangle H_e = (h_1 - h_2) + \frac{q^2}{2g}(\frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2})$$

$$= (h_1 - h_2) + \frac{q^2}{2g}(\frac{h_2^2 - h_1^2}{h_1^2 h_2^2}) \text{ --- ③}$$

그런데 ②식에서

$$h_2^2 + h_1 h_2 - \frac{2q^2}{gh_1} = 0$$

$\frac{q^2}{g} = \frac{h_1}{2}(h_2^2 + h_1 h_2)$를

③식에 대입하면

$$\triangle H_e = (h_1 - h_2) + \frac{1}{2}\frac{h_1}{2}(h_2^2 + h_1 h_2)(\frac{h_2^2 - h_1^2}{h_1^2 h_2^2})$$

$$= (h_1 - h_2) + \frac{h_1 h_2}{4}(h_2^2 + h_1 h_2)(\frac{h_2^2 - h_1^2}{h_1^2 h_2^2})$$

$$= \frac{4h_1 h_2(h_1 - h_2) + (h_2 + h_1)(h_2^2 - h_1^2)}{4h_1 h_2}$$

$$= \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2}$$

$$\triangle H_e = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2}$$ (도수에 의한 에너지 손실을 구하는 공식)

* 도수전후의 수심의 차가 클수록 에너지 손실은 커진다.

<도수의 길이 : L>

· Smetane 공식

$$L = 6(h_2 - h_1)$$

· Sofrance 공식

$$L = 4.5h_2$$

◎ USBR공식(미개척국)

$$L = 4.1h_2$$

예제 5.14 수평 직사각형 수로의 도수에 대하여 단위 폭당 유량 $5m^3/\sec$, 사류 수심 $H_1 = 0.4m$라 하고 상류수심, 상류유속, 에너지손실 및 도수의 길이를 구하라.

(풀이)

(1) 상류수심 $H_2 = -H_1/2 + H_1/2\sqrt{1+8F_{r1}^2}$

$$V_1 = \frac{q}{H_1} = \frac{5}{0.4} = 12.5m/\sec$$

$$F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gH_1}} = \frac{12.5}{\sqrt{9.8 \times 0.4}} = 6.31 > \sqrt{3} \quad \therefore \text{완전도수}$$

$$H_2 = -\frac{0.4}{2} + \frac{0.4}{2}\sqrt{1+8\times 6.31^2} = 3.38m$$

(2) 상류유속 $V_2 = \frac{q}{H_2} = \frac{5}{3.38} = 1.48m/\sec$

(3) 에너지손실 $\Delta H_e = \frac{(H_2 - H_1)^3}{4H_1 H_2} = \frac{(3.38-0.4)^3}{4\times 3.38 \times 0.4} = 4.89m$

(4) 도수의 길이:

사프라네츠공식 : $L=4.5H_2=4.5\times3.38=15.2m$

린드퀴스트공식 : $L=5(H_2-H_1)=5(3.38-0.4)=14.9m$

위이치키 공식 : $L=(8-0.05\frac{H_2}{H_1})(H_2-H_1)$

$$=(8-0.05\times\frac{3.38}{0.4})(3.38-0.4)$$

$$=22.59m$$

<여수로(spillway)>

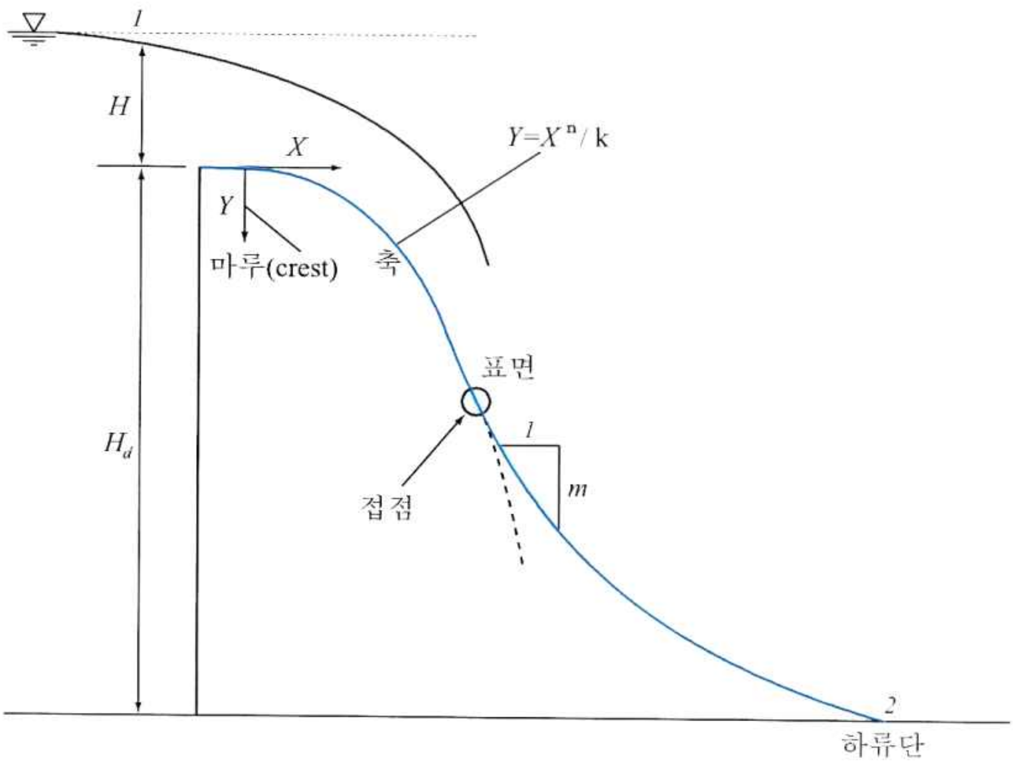
(1) 중력식 여수로

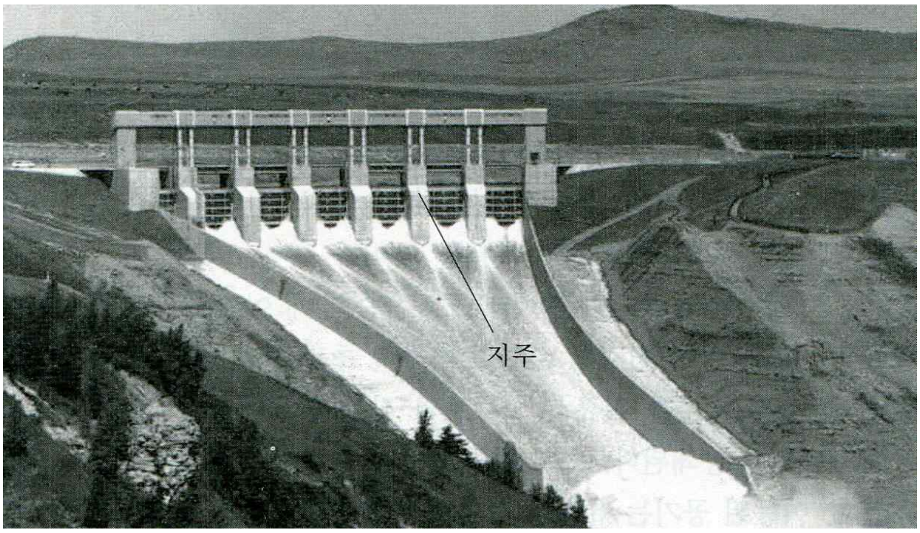
방류량공식 : $Q=CbH^{\frac{3}{2}}\ (m^3/\sec)$

여기서, b : 여수로 폭

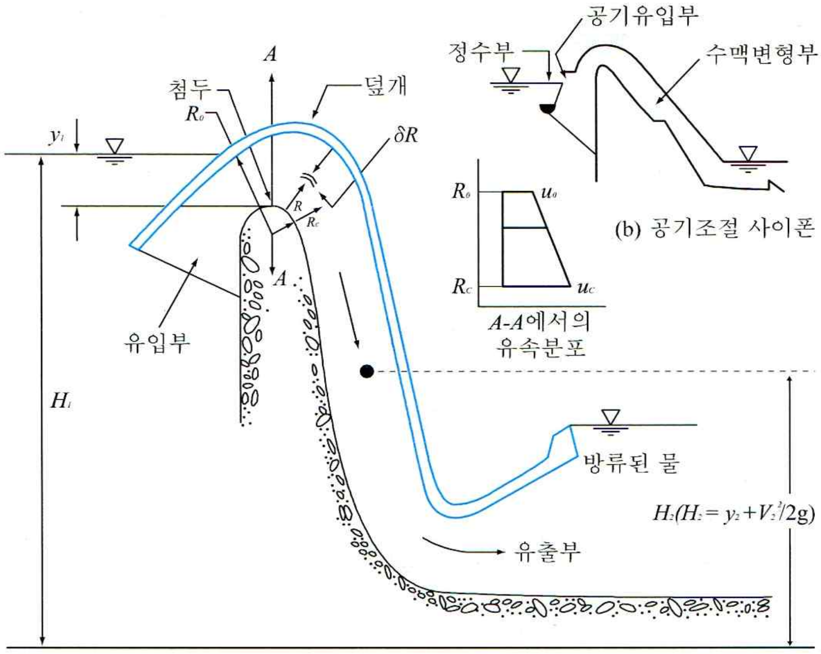
H : 월류 수심

C : 유량계수




지주

(2) 사이폰형 여수로


A
첨두
덮개
R_0
δR
y_1
R
R_c
A
유입부
H_1
공기유입부
정수부
수맥변형부
R_0
u_0
(b) 공기조절 사이폰
R_C
u_C
A-A에서의
유속분포
방류된 물
$H_2(H_2 = y_2 + V_2^2/2g)$
유출부

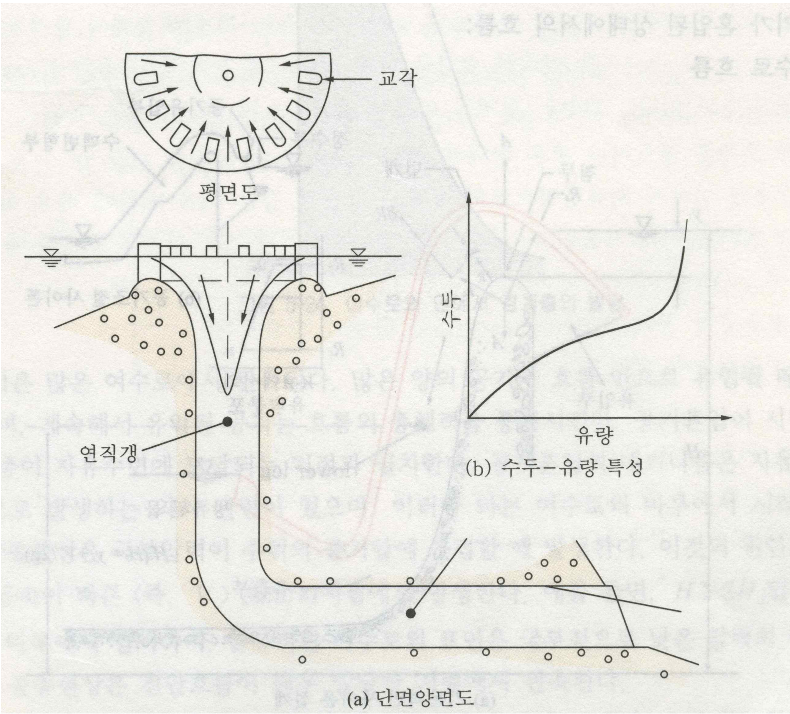
(2) 연직갱(나팔형) 여수로

방류량공식 : $Q = CLH^{\frac{3}{2}}\ (m^3/\sec)$

여기서, L : 마루호의 길이

H : 월류 수심

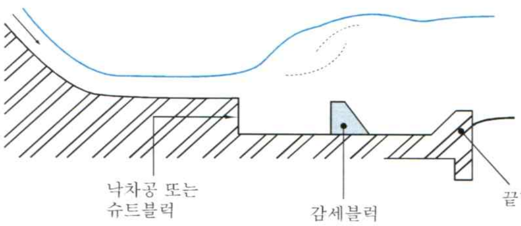
C : 유량계수(0.6~ 2.2)

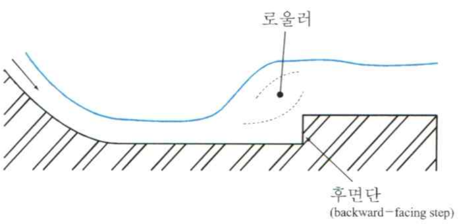


<감쇄지 설계>

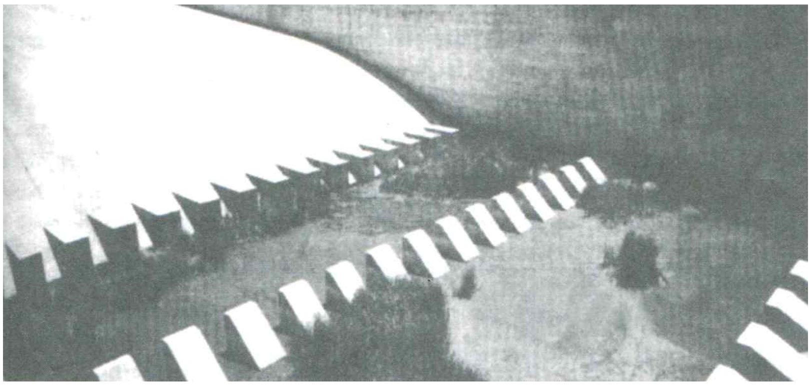
(1) 감세블럭(Baffle block)

여수로의 유출부로부터 방출된 흐름은 항상 발달된 사류이다. 이 흐름은 강한 바닥마찰응력을 가지고 있어 실트나 점토로 이루워진 곳에서 심각한 침식을 발생시킨다. 이 부분을 감세시키기 위해 감세지를 설치한다.

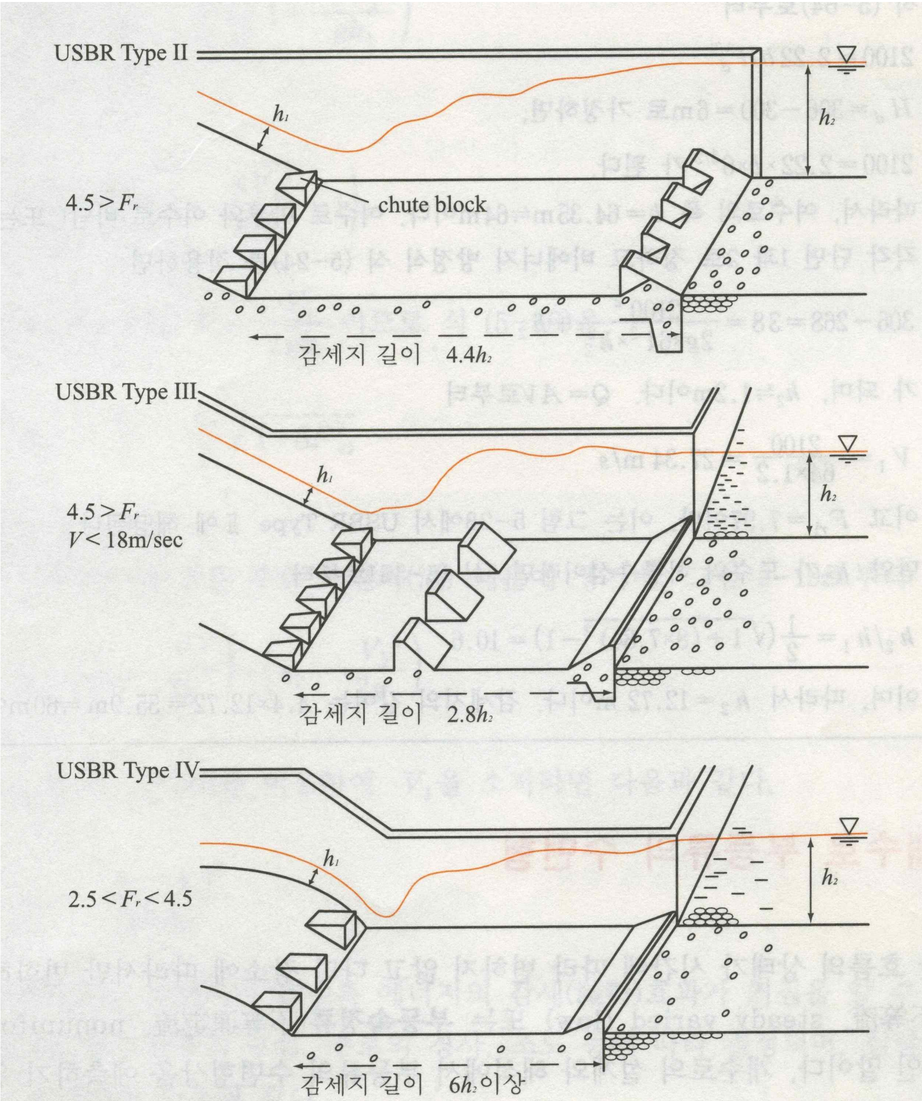




감세지 유입부에 슈트블럭(chute block) 또는 낙차공 그리고 유출부에 턱(sill)이 전폭에 걸쳐 설치된다. 그 외에 물받이에 따라 감세블럭(Baffle block)이 사용될 수 있다.



(2)감세지 표준 설계도



(a) **USBR Type II :** $F_{r1} > 4.5,\ V_1 > 20m \qquad L = 4.4h_2$

(b) **USBR Type III :** $F_{r1} > 4.5,\ V_1 < 20m \qquad L = 2.7h_2$

(c) **USBR Type IV :** $2.5 < F_{r1} < 4.5, \qquad L = 6.0h_2$

예제 5.15. 설계홍수량 $2100m^3/\mathrm{sec}$를 통과 시키는 중력식 여수로의 감세지를 설계하라. 댐의 바닥표고와 마루표고는 각각 268m와 300m이다. 저수지 설계수위는 306m이고 C는 $2.22m^{1/2}/\mathrm{sec}$이다.

(풀이) 여수로 방류량 공식 $Q = CbH_d^{3/2}$ 로부터

$$2100 = 2.22bH^{3/2}$$

$H = 306 - 300 = 6m$ 라 하면

$$2100 = 2.22 \times b \times 6^{3/2}$$

$$b = 64.35 \fallingdotseq 64m$$

여수로 마루와 하류단에 비에너지 방정식을 적용하면

$$\alpha \frac{V^2}{2g} + h = \alpha \frac{V_1^2}{2g} + h_1$$

$$\alpha = 1,\ V = 0,\ h = 306 - 268 = 38m,\ V_1 = \frac{Q}{bh_1}$$

$$38 = \frac{2100^2}{2 \times 9.8 \times 64^2 \times h_1^2} + h_1$$

$$h_1 = 1.2m$$

$$V_1 = \frac{2100}{64 \times 1.2} = 27.34m/\sec$$

$$F_{r1} = \frac{V_1}{\sqrt{gh_1}} = \frac{27.34}{\sqrt{9.8 \times 1.2}} = 7.97$$

$F_{r1} > 4.5,\ V_1 > 20m/\sec$이므로 USBR II에 해당된다.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8 \times F_{r1}^2} - 1)$$

$$\frac{h_2}{1.2} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8 \times 7.97^2} - 1)$$

$$h_2 = 12.72m$$

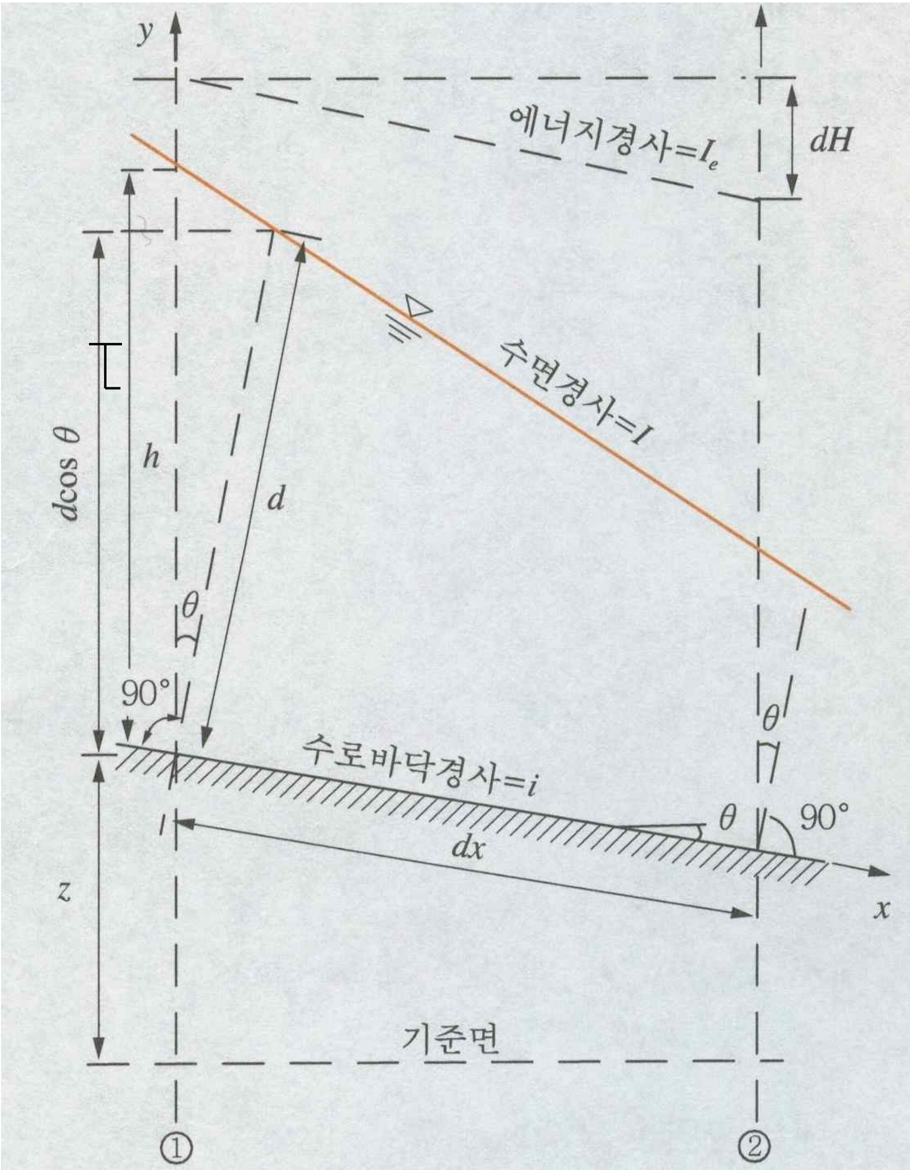
$$L = 4.4h_2 = 4.4 \times 12.72 = 55.9 \fallingdotseq 60m$$

5.6 점변 부등류의 해석

1) 점변류 기본방정식

부등류 : 점변류(gradually varied flow) : 정수압의 법칙이나 **에너지방정식** 적용
급변류(Rapidly varied flow) : **운동량방정식** 적용

< 점변류 기본방정식 유도>



수로의 미소 길이 dx 구간의 점변류를 생각하면 단면 ①에서 전수두는

$$H = z + d\cos\theta + \alpha\frac{V^2}{2g}$$

θ가 작을 때 $\cos\theta \fallingdotseq 1$, $d \fallingdotseq h$

H를 x로 미분하면

$$\frac{dH}{dx} = \frac{dz}{dx} + \frac{dh}{dx} + \alpha \frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

에너지경사 $I_e = -\dfrac{dH}{dx}$이고, 수로바닥 경사 $i = \sin\theta = -\dfrac{dz}{dx}$를 대입하고 정리하면

$$i - I_e = \frac{dh}{dx} + \alpha \frac{d}{dx}\left(\frac{V^2}{2g}\right)$$

$$\frac{dh}{dx}[1 + \frac{d}{dh}\left(\frac{V^2}{2g}\right) = i - I_e$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - I_e}{1 + \dfrac{d}{dh}\left(\dfrac{V^2}{2g}\right)}$$

$V = \dfrac{Q}{A}$이므로

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - I_e}{1 + \dfrac{Q^2}{2g}\dfrac{d}{dh}\left(\dfrac{1}{A^2}\right)}$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - I_e}{1 - \dfrac{Q^2}{gA^3}\dfrac{dA}{dh}} \qquad \frac{dA}{dh} = B$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - I_e}{1 - \dfrac{Q^2 B}{gA^3}} = \frac{i - I_e}{1 - \dfrac{Q^2/A^2}{g(A/B)}} \qquad \frac{A}{B} = D$$

$$\frac{dh}{dx} = \frac{i - I_e}{1 - \dfrac{V^2}{gD}} \qquad F_r = \frac{V^2}{\sqrt{gD}}$$

$$\therefore \frac{dh}{dx} = \frac{i - I_e}{1 - F_r^2} \quad \text{(점변 부등류의 기본식)}$$

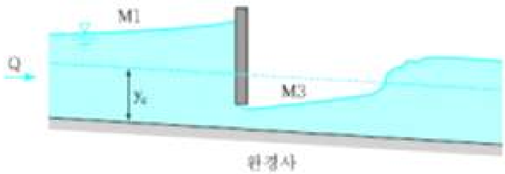
<수면곡선의 분류>

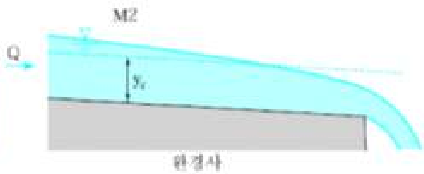
수면곡선의 분류

경사종류	경사분류	Froude 수	수면곡선분류
$S_0 < S_c$	완경사 (M)	$F_r < 1$ $F_r < 1$ $F_r > 1$	M1 M2 M3
$S_0 = S_c$	한계경사 (C)	$F_r < 1$ $F_r = 1$ $F_r > 1$	C1 C2 C3
$S_0 > S_c$	급경사 (S)	$F_r < 1$ $F_r > 1$ $F_r > 1$	S1 S2 S3
$S_0 = 0$	수평경사 (H)	$F_r < 1$ $F_r > 1$	H2 H3
$S_0 < 0$	역경사 (A)	$F_r < 1$ $F_r > 1$	A2 A3

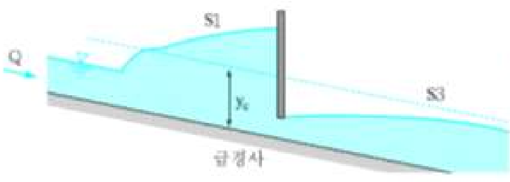
수면곡선의 분류

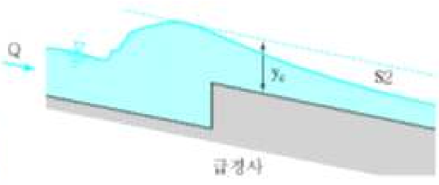
- 완경사 수면곡선





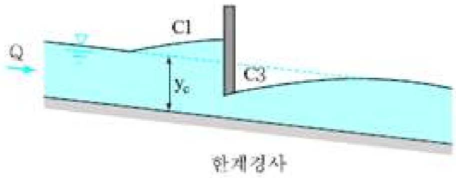
- 급경사 수면곡선

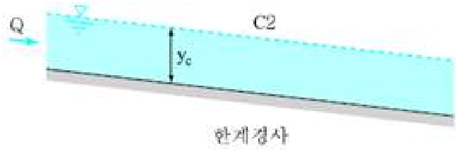




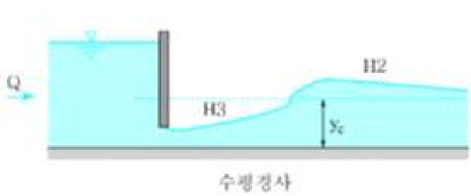
● 수면곡선의 분류

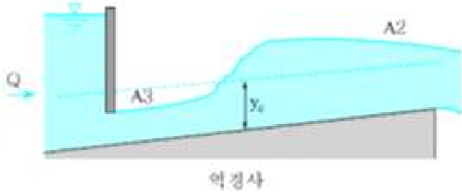
• 한계경사 수면곡선





• 수평 및 역경사 수면곡선





<수면곡선의 경계조건>

● 수면곡선의 경계조건

• 실제 흐름이 등류수심, 한계수심 및 수로바닥에 접근할 경우

① 등류수심에 접근하는 경우 :
이 경우 $y=y_n$이 되므로 기본식에서 오른쪽 항의 분자가 0이 되므로 $dx/dy=0$이 되어 수심의 변화가 없게 되므로 등류수심에 접근.

② 한계수심에 접근하는 경우 :
이 경우 $y=y_c$가 되므로 기본식에서 오른쪽 항의 분모가 0이 되므로 $dx/dy=\infty$이 되어 수면경사가 무한대가 되므로 한계수심과 직교.

③ 수심이 깊어지는 경우 :
이 경우는 $y\rightarrow\infty$로 기본식에서 $dy/dx=S_0$가 된다. 즉, 수심의 증가가 하상경사와 같으므로 수면은 수평을 유지하게 된다.

수면곡선의 경계조건

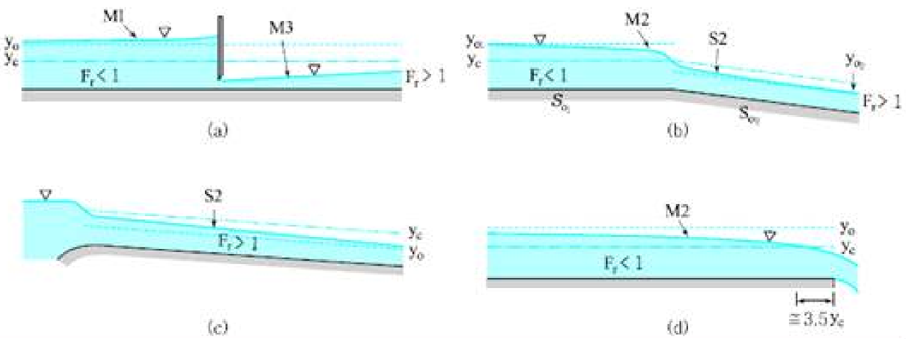
④ 수로바닥에 접근하는 경우 :
이 경우 y=0이 되므로 기본식에서 dy/dx=∞/∞가 되어 부정이 된다.
따라서 기본식을 다음과 같이 변형시키면

$$\frac{dy}{dx} = S_o \frac{y^3 - y_n^3\left(\frac{y_n}{y}\right)^{1/3}}{y^3 - y_c^3}$$

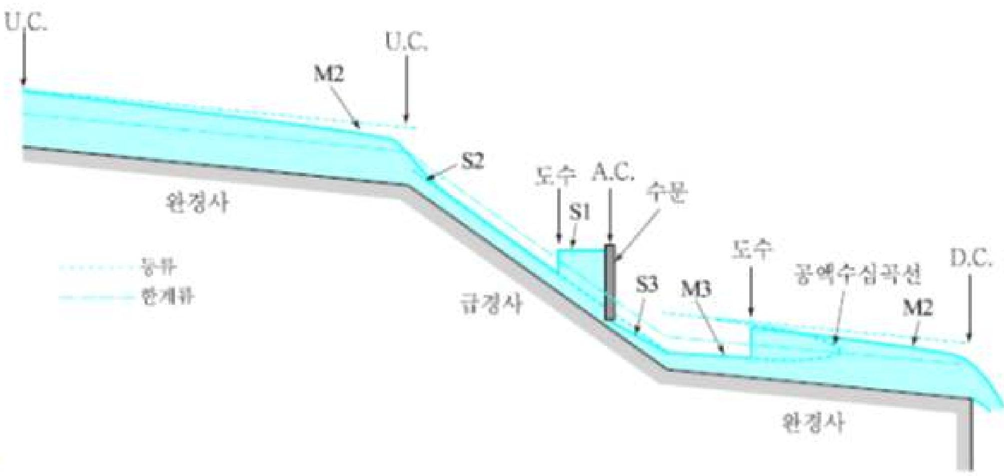
등류수심 및 한계수심은 0이 아니므로 결국 y=0이면 dy/dx=∞가 되어 수로바닥과 직교하는 형태가 된다.

통제단면

① 상류통제단면(upstream control section)
② 하류통제단면(downstream control section)
③ 인위적 통제단면(artificial control section)
- 상류 : 표면파가 상류로 전파 → 하류통제 → 상류방향으로 계산
- 사류 : 표면파가 하류로 전파 → 상류통제 → 하류방향으로 계산



● 복합수로



2) 수면곡선 계산법

● 수면곡선계산 방법

- 도식적분법(graphical-integration method) :
  점변류 기본방정식을 도식적으로 적분하여 수면곡선을 계산하는 방법
- 직접적분법(direct integration) :
  점변류 기본방정식을 직접 적분하여 수면곡선을 계산하는 방법
  - Bresse방법 : 광폭 직사각형단면 수로에만 적용
  - Chow방법 : 자연하천단면과 같은 임의 단면에 적용
- 축차계산법(step method) :
  수로를 짧은 구간으로 나누어 한 지점으로부터 다른 지점으로 단계적으로 수면곡선을 계산하는 방법
  - 직접축차계산법(direct step method) : 단면형이 일정한 대상수로
  - 표준축차계산법(standard step method) : 자연하천과 같은 하천

● 직접축차계산법(direct step method)

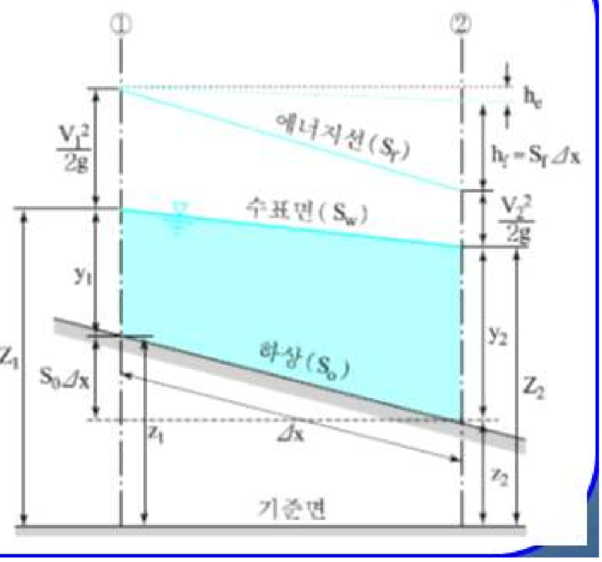
- 두 단면 ①과 ②에서의 총 에너지수두를 적용

$$S_o\Delta x + y_1 + \frac{V_1^2}{2g} = y_2 + \frac{V_2^2}{2g} + S_f\Delta x + h_e$$

$$\Delta x = \frac{E_2 - E_1}{S_o - S_f} = \frac{\Delta E}{S_o - S_f}$$

$$S_f = \frac{n^2V^2}{R_h^{4/3}} = \frac{n^2q^2}{y^{10/3}}$$

$$S_f = \frac{1}{2}(S_{f_1} + S_{f_2})$$



예제 5.16 수로경사가 0.001인 사다리꼴단면 수로에 $30m^3/\sec$ 의 유량이 흐르고 있다. 수로 저변폭이 10m이고 측벽경사가 1:2이다. 수로의 하류부 끝단에 구조물이 설치 되어 이 지점에서 수심이 5m로 측정되었다. Manning의 조도계수가 0.013일 때 **직접축차법**에 의해 수면곡선을 계산하라.

(풀이)

(1) 등류수심 y

$$Q = AV = A\frac{1}{n}R^{2/3}I_0^{1/2}\,[m^3/\sec]$$

$$A = y(b+zy) = y(10+2y)$$

$$P = b + 2y\sqrt{1+z^2} = 10 + 4.47y$$

$$R = \frac{A}{P} = \frac{y(10+2y)}{10+4.47y}$$

$$30 = y(10+2y)\frac{1}{0.013}\left[\frac{y(10+2y)}{10+4.47y}\right]^{\frac{2}{3}}(0.001)^{\frac{1}{2}}$$

$$[y(10+2y)]^{\frac{5}{3}} - 12.33(10+4.47y)^{\frac{2}{3}} = 0$$

시산법으로 풀면 $y = 1.09m$

(2) 한계수심 y_c

$$\frac{QT_c}{gA^3}=1 \text{ 또는 } \frac{A_c^3}{T_c}=\frac{Q^2}{g}$$

$$\frac{(10y_c+2y_c^2)^3}{(10+4y_c)}=\frac{30^2}{9.81}$$

시산법으로 풀면 $y_c=0.912m$

(3) $y > y_c$ 이고 $y_0 > y$ 이므로 완경사이고 배수곡선인 M_1이 된다.
따라서 계산 방향은 구조물 지점(통제단면)에서 상류쪽으로 수심이 등류 수심에 접근하는 점까지 계산

(4) 계산절차

① 1란 y : 시작수심 5m에서 등류수심까지 점차 감소시킨다.

② 2란 A : 1란 y에 대한 사다리꼴 면적

③ 3란 R : $R=\dfrac{A}{10+4.47y}$

④ 4란 V : $V=\dfrac{30}{A}$

⑤ 5란 S : $S=\dfrac{0.013^2\times 30^2}{A^2R^{4/3}}$

⑥ 6란 $\overline{S}$: 현재단면과 이전단면의 S의 평균값 $\overline{S}=\dfrac{1}{2}(S_1+S_2)$

⑦ 7란 $S-\overline{S}$: ⑤-⑥

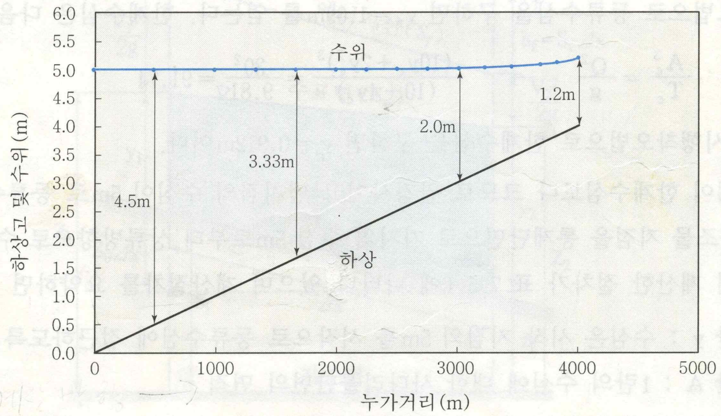
⑧ 8란 E : $E=y+\dfrac{V^2}{2\times 9.81}$

⑨ 9란 ΔE : $\Delta E=E_2-E_1$

⑩ 10란 Δx : $\Delta x=\dfrac{\Delta E}{S-\overline{S}}$

⑪ 11란 L : 시작점으로부터 누가 거리

y	A	R_h	V	S_f	$\overline{S}_f$	$S_o - \overline{S}_f$	E	⊿E	⊿x	L
5 00	100 0	3 09	0 30	0 000003			5 00459			0
4 50	85 5	2 84	0 35	0 000005	0 000004	0 000996	4 50627	0 49831	500 5	500 5
4 00	72 0	2 58	0 42	0 000008	0 000007	0 000993	4 00885	0 49743	500 8	,001.2
3 66	63 4	2 40	0 47	0 000012	0 000010	0 000990	3 67142	0 33743	340.8	1,342 1
3 33	55 5	2 23	0 54	0 000017	0 000014	0 000986	3 34490	0 32651	331 3	1 673 4
3 00	48 0	2 05	0 63	0.000025	0 000021	0 000979	3 01991	0 32499	332 0	2 005.4
2 75	42 6	1 91	0 70	0 000035	0 000030	0 000970	2 77525	0 24466	252 3	2,257 7
2 50	37 5	1 77	0 80	0 000050	0 000043	0 000957	2 53262	0 24263	253.5	2,511.2
2 25	32 6	1 63	0 92	0 000075	0 000063	0 000937	2.29310	0 23952	255.5	2,766.7
2 00	28.0	48	1 07	0 000115	0 000095	0 000905	2 05851	0 23459	259 2	3,025.9
1 80	24 5	1 36	1.23	0 000169	0 000142	0 000858	1 87655	0 18196	212 1	3,238 0
1 60	21 1	1 23	1 42	0 000258	0 000214	0 000786	1 70284	0 17371	220 9	3,458 9
1 40	17 9	1 10	1 67	0 000416	0 000337	0 000663	1 54285	0 15999	241 4	3 700 3
1 30	16 4	1 04	1 83	0 000541	0 000478	0 000522	1 47097	0 07188	137 8	3,838 1
1.20	14 9	0 97	2 02	0 000717	0 000629	0 000371	1 40718	0 06379	171 9	4,010 0



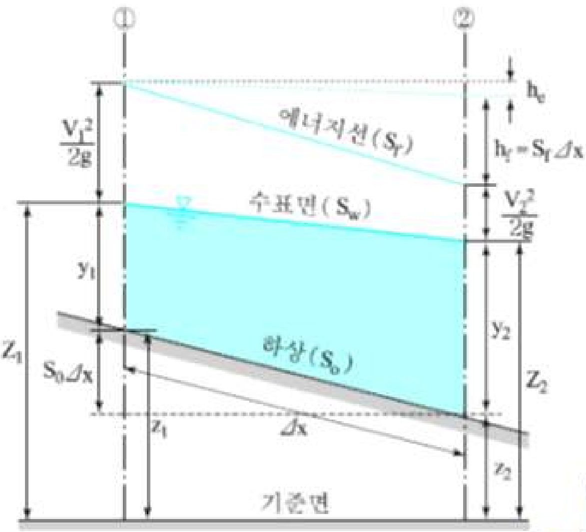
● 표준축차계산법(standard step method)

- 두 단면에서의 기준면에서 수면까지의 높이를 Z_1, Z_2

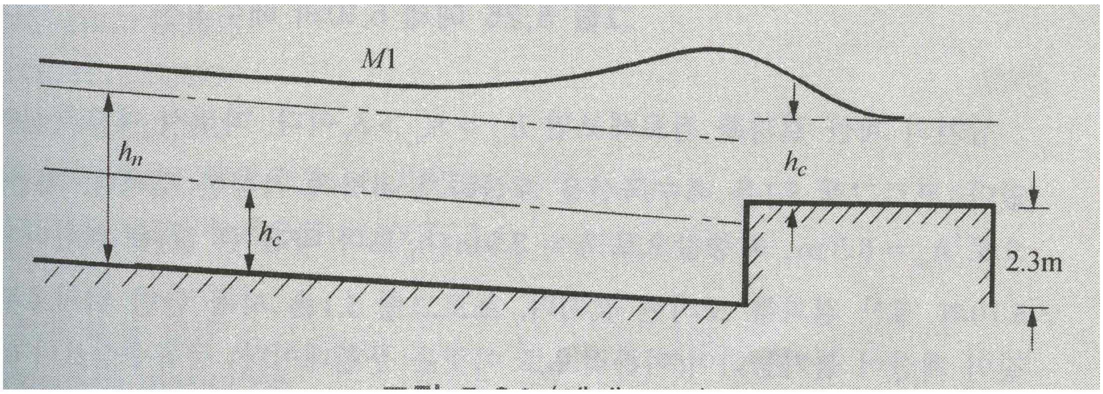
$$Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_f + h_e$$

$$h_f = \overline{S}_f \varDelta x = \frac{1}{2}(S_{f_1} + S_{f_2})\varDelta x$$

$$H_1 = H_2 + \overline{S}_f \varDelta x$$



예제 5.17 그림과 같은 홍수 상황에 주어진 조건이 다음과 같을 때 수면곡선을 구하시오. 단, 조건은 수로경사가 0.002인 사각형단면 수로에 $500m^3/\sec$ 의 유량이 흐르고 있다. 수로 폭이 40m이고, 수로의 하류부 끝단의 웨어는 높이 $2.3m$이고, 웨어 유량계수 0.85, Manning의 조도계수가 0.03일 때 **표준축차법**에 의해 수면곡선을 컴퓨터 프로그램을 이용하여 구하라.



(풀이)

표준축차법 FORTRAN PROGRAM CODE

```
C*********************************************************************C
C*********************************************************************C
C*********************************************************************C
C
C        [표준 축차법] BY LEE D.J.(2010.11), Kunsan National University
C
      PROGRAM STANDARD
C
C       사다리꼴수로 단면 수로 점변 부등류 수면곡선 계산 프로그램
C         아래에 열거한 개수로 자료 입력
C
C         Q  : 유량(CMS)
C         B  : 수로 저폭 (M)
C       DN :  MANNING 조도 계수 n
```

```
C         S  : 수로바닥 경사
C         DX : 단면 1과 단면 2와의 거리(M)
C         DL : 계산을 위한 총 거리(M)
C         WC : 위어 유량 계수
C         WH :  위어 높이(M)
C       WB : 사각형 위어 폭(M)
C       XM : 사다리꼴 단면 측벽 경사(직사각형 단면  XM=0.0)
C
      CHARACTER*60 TITLE
        OPEN(1,FILE='INPUT1.DAT',STATUS='UNKNOWN')
        OPEN(2,FILE='OUTPUT1.DAT')
        READ(1,8) TITLE
        WRITE(2,9) TITLE
        READ(1,*) Q,DN,S,B,DX,DL,WC,WH,WB,XM
    8 FORMAT(A60)
    9   FORMAT(/, 3X,A55 ' 계산 결과')
C
C    등류 수심 계산
C
      DK=ABS(S)**0.5/DN
        YO=(Q/(B*DK))**0.6
        YG=YO
        QK=Q
C
    5   CONTINUE
      YG=YG+0.001
      SA=YG*(B+XM*YG)
      SP=B+2.*SQRT(1+XM*XM)*YO
      SR=(SA/SP)**0.6667
        SF=SA*SR*DK
C
        ERR=(QK-SF)
        IF(ERR.LE.0.001) GO TO 6
        GO TO 5
    6 YO=YG
c
C
C         한계수심 계산
C
        DK2=Q**2/(B**2.*9.81)
        YCG=DK2**0.3333
```

```
          YL=Q*Q/9.81
          IF(XM.EQ.0.0) GO TO 11
    7     CONTINUE
          YR=(B*YCG+XM*YCG*YCG)**3/(B+2*XM*YCG)
C
        ERRY=(YL-YR)
          IF(ERRY.LE.0.05) GO TO 11
          YCG=YCG-0.001
          GO TO 7
   11  YC=YCG
C
C    YO :등류 수심
C    YC :한계수심
C
C      처음 경계수심 계산
        Q1=Q/(1.705*WC*WB)
          Y1=(Q1)**0.667+WH
C
C      표준 축차법
C
        DK=(DN*Q)**2.
        WRITE(2,15)
   15     FORMAT(//,'   Y(m)   A(m^2)    P(m)      EG         Se  '
     &  '     (S-Se)(m)     DE     EC(m)      L(m)')
C
          DO 10 I=1,100
        X=(I-1)*DX
          A1=(B+XM*Y1)*Y1
          P1=B+2*Y1*SQRT(1+XM*XM)
          E1=Y1+(Q/A1)**2.0/19.62
          SE1=DK*P1**1.3333/A1**3.3333
          IF(X.EQ.0.) THEN
          WRITE(2,16)Y1,A1,P1,E1,SE1,E1,X
   16  FORMAT(/,1X,F5.2,1X,F7.2,1X,F7.2,1X,F7.4,1X,F7.4,18X,F7.4,1X,F7.0)
        ENDIF
          COT=ABS(X)
          IF(COT.GE.DL) GO TO 999
          Y2=Y1+(S-SE1)*DX
  998  CONTINUE
        A2=(B+XM*Y2)*Y2
          P2=B+2.*Y2*SQRT(1+XM*XM)
```

```
         E2G=Y2+(Q/A2)**2./19.62
         SE2=DK*P2**1.3333/A2**3.3333
         SEM=S-(SE1+SE2)/2.
         DE=DX*SEM
         E2=E1+DE
         ER1=E2-E2G
         ER2=E2G-E2
         IF(ER1.GT.0.001) THEN
         Y2=Y2+0.001
         END IF
         IF(ER2.GT.0.001) THEN
         Y2=Y2-0.001
         ENDIF
         ERR=ABS(ER1)
         IF(ERR.GT.0.002) GO TO 998
         WRITE(2,17) SEM,DE
  17  FORMAT(38X,F7.4,3X,F7.4)
       X=I*DX
         WRITE(2,16) Y2,A2,P2,E2G,SE2,E2,X
         Y1=Y2
 10   CONTINUE
 999  CONTINUE
       WRITE(2,150) YO,YC
150   FORMAT(//, 1X,'등류수심=',F10.2,'m',10X, '한계수심=',F10.2,'m')
         END PROGRAM STANDARD
```

INPUT DATA

```
부등류 수면형계산 (수리학,전일권저,p268,예제5-11)
 500. 0.03  0.002  40. -100. 2000. 0.85  2.3  40.  0.
```

OUTPUT DATA

```
 부등류 수면형계산 (수리학,전일권저,p268,예제5-11)  계산 결과


 Y(m)  A(m^2)   P(m)     EG       Se     (S-Se)(m)    DE     EC(m)      L(m)

 6.51   260.35   53.02  6.6968  0.0004                      6.6968       0.
                                      0.0016    -0.1586
```

6.34	253.66	52.68	6.5396	0.0004			6.5382	−100.
					0.0016	−0.1552		
6.18	247.06	52.35	6.3853	0.0005			6.3834	−200.
					0.0015	−0.1515		
6.01	240.57	52.03	6.2344	0.0005			6.2329	−300.
					0.0015	−0.1474		
5.85	234.23	51.71	6.0879	0.0005			6.0860	−400.
					0.0014	−0.1429		
5.70	228.02	51.40	5.9455	0.0006			5.9441	−500.
					0.0014	−0.1381		
5.55	221.99	51.10	5.8084	0.0006			5.8065	−600.
					0.0013	−0.1328		
5.40	216.13	50.81	5.6761	0.0007			5.6747	−700.
					0.0013	−0.1272		
5.26	210.49	50.52	5.5498	0.0008			5.5480	−800.
					0.0012	−0.1211		
5.13	205.04	50.25	5.4291	0.0008			5.4279	−900.
					0.0011	−0.1145		
5.00	199.85	49.99	5.3152	0.0009			5.3137	−1000.
					0.0011	−0.1076		
4.87	194.92	49.75	5.2084	0.0010			5.2067	−1100.
					0.0010	−0.1004		
4.76	190.28	49.51	5.1089	0.0010			5.1071	−1200.
					0.0009	−0.0929		
4.65	185.93	49.30	5.0168	0.0011			5.0151	−1300.
					0.0009	−0.0852		
4.55	181.89	49.09	4.9323	0.0012			4.9308	−1400.

					0.0008	-0.0774		
4.45	178.16	48.91	4.8554	0.0013			4.8541	-1500.
					0.0007	-0.0696		
4.37	174.78	48.74	4.7866	0.0013			4.7849	-1600.
					0.0006	-0.0620		
4.29	171.75	48.59	4.7257	0.0014			4.7238	-1700.
					0.0005	-0.0547		
4.22	169.02	48.45	4.6716	0.0015			4.6703	-1800.
					0.0005	-0.0477		
4.16	166.62	48.33	4.6245	0.0016			4.6231	-1900.
					0.0004	-0.0412		
4.11	164.53	48.23	4.5840	0.0016			4.5825	-2000.

등류수심= 3.83m 한계수심= 2.52m

5.7 HEC-RAS를 이용한 개수로 홍수위 계산법

제 1 장 소 개

수공학 센터의 하천 해석 시스템(Hydrologic Engineering Center's River Analysis System; HEC-RAS)에 온 것을 환영합니다. 이 소프트웨어는 사용자가 일차원 정상류 흐름, 비정상류 흐름, 하천토사 이송/ 이동하상 변동 계산 그리고 수온 모델링을 할 수 있도록 기획한 프로그램입니다.

HEC-RAS 모델링 시스템은 수공학 센터의 차세대(Next Generation) 소프트 웨어의 일부로서 개발되었다.. 차세대(NexGen) 프로젝트는 수공학의 다음 몇 가지 토픽을 포함하고 있다. - 강우 유출 해석(HEC-MAS: rainfall-runoff analysis), 하천 수리학(HEC-RAS:river hydraulics), 저수지 모형(HEC-ResSim:reservoir system simulation), 홍수 피해 해석(HEC-FDA & HEC-FIA:flood damage analysis) , 저수지 방류에 대한 실시간 하천 수위 예보(CWMS:real-time river forecasting for reservoir operations).

이 장은 HEC-RAS의 일반적인 원리에 대해 기술하고 이 시스템 기능의 개략적인 개요를 설명한다. HEC-RAS 관련 문서서들과 이 매뉴얼의 개요를 알아본다.

목 차

HEC-RAS 모델링의 일반적인 원리

HEC-RAS는 다중작업과 다중 사용자 넷워크의 환경에서 서로 상호작용할 수 있도록 설계된 통합 시스템 프로그램이다. 이 시스템은 그래픽 사용자 인터페이스(GUI), 분리된 수리학적 해석 요소, 데이터 저장 및 관리기능과 그래픽 및 보고서 작성 기능을 갖추고 있다.

HEC-RAS 시스템은 궁극적으로 다음의 1차원 수리학적 해석 요소 4개를 포함하고 있다. (1) 정상류 수면형의 계산 (2) 비정상류 수치모의 (3) 이동하상의 토사 이송 계산 그리고 (4) 수질 해석 여기서 중요한 점은 4 구성요소는 모두 공통인 기하 데이터, 공통의 수리 계산 과정을 사용한다는 것이다. 4 개의 수리 해석요소에 더해서 시스템은 일단 기본 수면형이 계산되면 여러 수리구조물 설계 기능을 작동시킬 수 있다.
현재 HEC-RAS 4.0 이상 버전은 정상류 수면형 및 비정상류 계산, 토사 이송/이동하상 변화 계산 그리고 수질 해석 기능을 포함하고 있다. 앞으로 새로운 기능들이 추가될 것이다.

프로그램 기능의 개요

HEC-RAS 는 자연 및 인공 수로의 모든 하천에 대해 일차원 수리 계산을 수행하도록 디자인되었다. 다음은 HEC-RAS의 주요 기능에 대한 설명이다.

사용자 인터페이스

사용자는 그래픽 인터페이스(GUI)를 통해 HEC-RAS를 사용한다. GUI를 디자인한 주요 목적은 사용자가 효율적으로 수준 높게 소프트웨어를 사용하도록 하기 위한 것이다. GUI는 다음과 같은 기능을 가지고 있다.

■ 파일관리(File management)

■ 데이터 입력과 편집(Data entry and editing)

■ 수리해석(Hydraulic analyses)

■ 입출력 데이터의 도표 화면표시(Tabulation and graphical displays of input and output data)

■ 보고서 작성 기능(Reporting facilities)

■ 온라인 도움말(On-line help)

수리 해석 요소

정상류 수면형 해석

이 수리 해석 요소는 정상 점변류에 대한 수면형을 계산한다. 이것은 나뭇가지형 하천(dendritic system), 단일 수로 하천(single river reach)등 모든 수로망에 적용된다. 이 정상류해석은 상류, 사류, 혼합류의 수면형을 모델링할 수 있다.
기본 계산과정은 일차원 에너지 방정식의 풀이에 기초를 둔다. 에너지 손실 계산은 마찰공식(Manning 공식)과 수축 및 팽창 공식(계수*속도수두)에 의해 구해진다. 수면형이 빠르게 변화하는 수류에는 에너지 방정식 대신에 운동량 방정식이 적용된다. 이러한 경우는 혼합류계산(즉,도수 수리), 교량 주위의 수리 계산, 하천 합류 지점의 수면형 계산(즉, 교차점 수리)이 해당된다.
정상류 해석에서는 교량, 암거 위어, 홍수 범람원에 설치된 구조물들과 같은 여러 장애물의 영향이 고려된다. 원래 정상류해석 시스템은 홍수 범람원 관리와 홍수로(洪水路) 침해 지역을 평가하는 홍수예방 연구에 적용하기 위해 설계되었다. 또한 이 기능은 수로 및 제방의 개수로 인한 수면형의 변화를 평가하는데 이용된다.
정류해석 요소의 특징:
1) 다중 계획(plan) 해석
2) 다중 수면형 계산
3) 다중 교량 및 암거 개구(opening) 해석
4) 분류(分流)의 최적화

비정상류 수면형 모의

이 해석 시스템은 개수로의 전체 수로망에 대해 일차원 비정상류 흐름을 모의 실험할 수 있는 기능을 갖고 있다. 비정상류 방정식 풀이는 Dr. Robert의 UNET 모델(Barkau, 1992 and HEC, 1993)이 적용된다. 비정상류 해석 요소는 근본적으로 사류해석을 위해 개발되었다. 그러나 HEC-RAS 3.1 버전의 출시로 현재 비정상류계산 모듈에서 혼합류 흐름 해석(상류, 사류, 도수 그리고 낙차흐름)이 가능하게 되었다.

정상류 해석을 위해 개발되었던 수로단면, 교량, 암거 그리고 다른 수리 구조물의 수리 계산은 비정상류 해석 모듈에 통합되었다.

비정상류해석 요소의 특징:

1) 댐 붕괴 해석
2) 제방 월류와 침식 계산
3) 펌프장 설치 운영
4) 항해댐 운영
5) 수압관 해석

토사 이송과 이동하상 계산

이 해석 시스템은 적당한 시간(1회성 홍수에 적용 가능하지만, 전형적으로 1년)동안 퇴적과 침식으로 인한 일차원 토사 이송량과 이동하상 변화를을 모의 실험할 목적으로 개발되었다.

토사 이송 포텐셜은 토사 입경 별로 계산된다. 따라서 흐름으로 인해 생성된 토사 분류(sorting) 및 토사 피복(armoring)의 모의가 가능하다. 주요 기능은 전수로망에 대해 흐름, 수로준설, 다양한 둑, 침식지를 모델링할 수 있고, 토사 이송 계산에 몇 개의 서로 다른 방정식이 사용 가능하다.

이 해석 시스템은 수로의 유량과 수위의 발생빈도와 지속기간이 변하거나, 또는 수로의 기하형상이 변하여 발생되는 수로의 장기간 침식과 퇴적량을 모의하기 위해 설계되었다. 이 시스템은 고정상 수로에 유사를 평가하고, 큰 홍수 기간동안 가능한 최대 침식을 추산하고, 퇴적율에 의해 준설량을 예측하고, 선박 항해 가능한 수심을 유지하는데 요구되는 수로 축소부를 디자인하고, 저수지 안에 퇴적량을 구하는데 사용된다.

수질 해석

이 해석 시스템은 사용자가 하천 수질해석을 할 수 있도록 기획되었다. 현 HEC-RAS 버전은 상세한 수온해석과 제한된 수의 수질변수(Algae, DO, COD, BOD, Dissolved Othophosphate, DOP, Dissolved Ammonium Nitrate, Dissolved Nitrite Nitrogen, Dissolved Nitrate Nitogen 그리고 DON)의 해석을 수행할 수 있다. 향후 버전에는 몇가지 수질변수

의 해석 기능들이 추가될 것이다.

데이터 저장과 관리

데이터는 HEC_DSS(HEC 데이터 저장 시스템)은 물론이고 "flat"(ASCII, binary)파일에 저장된다. 사용자 입력 데이터는 "project", "plan"," geometry", "steady flow", "unsteady flow", "sediment" 의 카테고리 하에 분리된 형태의 ASCII 파일로 저장된다. 출력 데이터는 대부분 분리된 바이너리(binary)파일에 저장된다. 데이터는 HEC-DSS을 이용하여 HEC-RAS와 타 프로그램 사이 전송이 가능하다.

데이터 관리는 사용자 인터페이스로 수행된다. 모델 사용자는 개발 중인 프로젝트에 단일 파일명을 입력해야 한다. 일단 프로젝트명이 입력되면, 자동적으로 모든 다른 파일들이 만들어지고 사용자 인터페이스에 의해 이름이 지어진다. 사용자 인터페이스는 프로젝트 별로 파일들에 대해 다시 이름 붙이기, 옮기기, 지우기 기능을 제공한다.

도면 및 보고서 작성

그래픽은 하천 조직도, 횡단면, 종단면형, 수위-유량곡선, 수리 그래프, 여러 다른 수리 변수들의 x-y 2차원 도면 작성 기능을 갖고 있다. 여러 횡단면을 가진 3차원 도면 작성 기능도 제공된다. 그리고 표(tables)의 출력도 이용할 수 있다. 사용자는 미리 짜놓은 표를 선택할 수도 있고 그들 자신만의 표를 개발할 수도 있다. 모든 그래픽과 표는 화면 출력할 수 있고, 프린트할 수 있고, 워드프로세서나 스프레드시트와 같은 다른 소프트웨어에 보낼 수 있다.

보고서 작성 기능은 출력 데이터 뿐만 아니라 입력 데이터도 프린트 가능하다. 그리고 보고서는 사용자가 원하는 정보의 량과 형식에 따라 제작될 수 있다.

HEC-RAS 문서

HEC-RAS 패키지는 몇 가지 문서들을 담고 있다. 각 문서는 사용자가 모델링의 시스템의 특별한 기능을 배우는데 도움이 될 수 있도록 설계되었다.

문서	설명
User's manual	이 매뉴얼은 HEC-RAS 사용법에 대한 안내서이다. 매뉴얼에는 모델 시스템의 소개와 개요, 프로그램 설치법, 시작 방법, 간단한 예제, 주요 모델 해석 요소에 대한 자세한 설명. 그래픽 및 도표를 화면 상에서 보는 방법이 기술되어 있다.
Hydraulic reference manual	이 맨뉴얼은 HEC-RAS에 수행되는 수리계산에 필요한 데이터와 이론을 설명한다. 그리고 사용 방정식들이 식 유도에 사용된 가정과 함께 제시되어 있다. 여기서 다양한 모델 해석 방법의 안내는 물론 모델 파라미터를 추정하는 방법에 대한 논의가 제시되어 있다.
applications guide	이 문서는 HEC-RAS의 다양한 관점을 논증하는 일련의 예제들를 담고 있다. 각 예제는 문제 설명문, 필요한 데이터, 일반적인 풀이 절차, 입 출력 화면의 설정, 모델 해석의 중요 관점에 대한 논의로 구성되어 있다 .

이 매뉴얼의 개요

이 사용자 매뉴얼은 HEC-RAS를 사용하는 방법에 대한 중요한 문서이다. 매뉴얼은 다음과 같은 내용으로 구성되어 있다.

■ 1- 2장은 HEC-RAS 소프트웨어의 설치 방법과 그의 개요와 소개를 담고 있다.

■ 3 – 5장에서는 사용자가 따라해 볼 수 있는 간단한 예제와 차례차례로 HEC-RAS 소프트웨어를 사용하는 방법을 설명한다. 이 시스템이 프로젝트에 어떻게 적용되는지 이해할 수 있게 해준다.

■ 6 – 8장은 이용할 수 있는 여러 해석 방법과 데이터를 입력하고 편집하는 방법을 설명한다.

■ 9장은 사용자 정의의 표 작성법은 물론, 도표 출력을 보는 방법에 대해 상세하게 설명한다.

■ 10장은 홍수 침해 해석을 수행하는 방법을 설명한다.

■ 11장은 "trouble shooting"과 가장 일반적인 에러, 경고, 주의에 대해 설명한다.

■ 12장은 HEC-RAS에서 교량 주위 침식계산을 수행하는 방법을 설명한다.

■ 13장은 HEC-RAS에서 수로 수정을 수행하는 방법을 설명한다.

■ 14장은 HEC-RAS에서 GIS/CADD데이터를 이용하는 방법과 GIS/CADD시스템에

HEC-RAS의 결과를 보내는 방법에 대해 설명한다.

■ 15장은 토사이송 포텐셜계산과 사석치수 계산은 물론, 안정적인 수로 설계와 해석을 수행하기 위한 HEC-RAS의 수로설계기능(Hydraulic Design Functions)의 이용방법을 기술한다.

■ 16장은 혼합 비정상류 해석, 댐 붕괴 해석, 제방 월류와 침식 계산, 펌프장으로 인한 흐름 해석, 항해 댐으로 인한 흐름 해석을 포함하여 고도의 비정상류 모의 기법의 이용에 관한 주제를 담고 있다.

■ 17장은 HEC-RAS를 가지고 하천의 토사이동 계산을 수행하는 주제를 담고 있다.

■ 18장은 SIAM을 사용하여 토사이동이 하천에 미치는 영향에 대해 논의 한다. SIAM은 흐름과 토사의 경계조건 변화로 인한 하천 토사의 이동경향을 알아보기 위해 이용되는 일종의 토사 수지모델이다.

■ 19장은 하천 시스템 내에서 수질해석을 수행하기 위해 사용되는 방법을 기술하고 있다..

■ Appendix A는 참고 문헌 목록을 담고 있다.

■ Appendix B는 HEC-RAS을 통해 오가는 GIS 데이터의 입출입을 위한 파일 포맷에 대한 자세한 설명을 담고 있다.

■ Appendix C는 HEC-RAS 프로그램에서 얻을 수 있는 모든 출력변수에 대한 설명을 담고 있다.

제 2 장 HEC-RAS 인스톨

여러분은 셋업 프로그램을 사용하여 HEC-RAS를 인스톨할 수 있다. 셋업을 실행하면 메인 프로그램, 적용예제, 도움말을 여러분의 PC에 설치할 수 있다.

이 장은 HEC-RAS를 사용하는데 필요한 하드웨어와 시스템 요구사항과 인스톨하는 방법, 언인스톨 하는 방법을 설명한다.

목 차

■ 하드웨어와 시스템 요구사항

■ 인스톨 과정

■ 언인스톨 과정

주 의

여러분은 간단하게 디스켓에서 여러분의 하드디스크에 HEC-RAS 파일을 복사해서 HEC-RAS를 실행시킬 수 없다. 여러분은 반드시 적당한 디렉토리에 파일을 인스톨하고 언인스톨할 수 있는 셋업 프로그램을 사용해야 한다.

하드웨어와 소프트웨어 요구사항

여러분이 HEC-RAS 소프트웨어를 인스톨하기 전에 여러분의 컴퓨터가 적어도 최소한의 하드웨어와 소프트웨어를 가지고 있는지 검토해야 한다. HEC-RAS 소프트웨어를 최대한으로 구동하기 위한 PC 사양은 다음과 같다. HEC-RAS 4.1 버전은 다음 사항을 가진 컴퓨터에서 원만이 실행될 수 있다.

■ CPU 펜티엄 III 이상의 IBM 및 호환 기종 컴퓨터

■ 적어도 10 GB 이상의 여유공간을 가진 하드디스크 (HD)

■ 시디롬 드라이브(DVD) : Web 사이트에서 프로그램을 다운 받을 때 필요 없음

■ RAM의 최소 용량 1GB 이상

■ 마우스

■ Color VGA(1024x768) 또는 그 이상의 Super VGA Display

■ MS Windows XP, Vista 버전 또는 Windows 7 운영체제

인스톨 절차

HEC-RAS 소프트웨어의 인스톨은 셋업 프로그램을 사용하여 실행할 수 있다. 셋업 프로그램을 실행할 때 여러분은 다음 절차를 따르도록 권장한다.

1. HEC-RAS 프로그램 다운 사이트(hppt://www.hec.usace.army.mill/software/hec-ras/)에 접속한다. 본 홈피의 "추천 사이트" <HEC-RAS>를 클릭해도 된다.

2. Download에서 <HEC-RAS 4.0>를 클릭하여 여러분의 PC의 임시 디렉토리(C:\TEMP)에 다운 저장한다. 여기서 바로 셋업을 "실행" 시킬 수 있으나 셋업파일을 보관하기 위에 디렉토리 TEMP에 "저장"하면 좋다

3. TEMP에 가서 다운받은 파일(HEC-RAS_40_Setup.exe)을 마우스 더블클릭하여 셋업을 실행시킨다. 이때 여러분의 PC에 압축풀기(알집, 7-zip) 프로그램이 설치되어 있어야 한다.

4. 가능 하면 스크린의 지시에 따라 셋업을 수행한다. 셋업이 끝나면, 바탕화면에 HEC-RAS 아이콘이 생긴다. 이 아이콘을 마우스 클릭하여 Hec-RAS를 구동 시킬 수 있다. 아이콘이 보이지 않을 겨우, C:\Program Files\HEC\HEC-RAS 로 가서 RAS.EXE 를 클릭하라

언인스톨 절차

HEC-RAS 프로그램을 여러분의 PC에서 삭제하려면 다음 절차로 실행한다.

1. 윈도우 시작 화면-설정- <제어판>으로 간다.

2. 제어판 메뉴 <프로그램 추가/제거> 선택한다.

3. 팝업 창에 뜬 프로그램 목록에서 <HEC-RAS>를 찾아 제거한다.

4. 바탕화면의 HEC-RAS 아이콘을 지운다.

5.8 개수로 손실수두

1) 수로입구에서 발생되는 손실 수두

$$h_i = f_i \frac{V_2^2}{2g} + \frac{1}{2g}(V_2^2 - V_1^2)$$

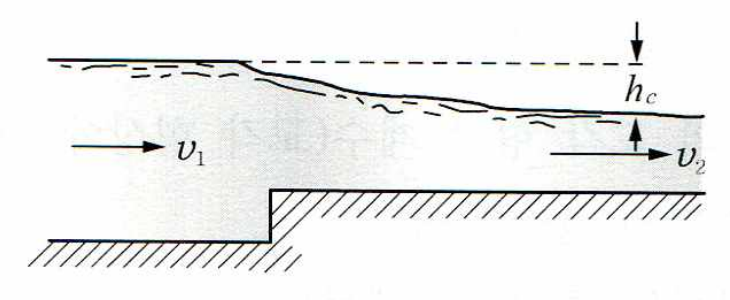
여기서, f_i : 유입손실계수

V_1 : 유입전의 유속

V_2 : 유입후의 유속

2) 수로 바닥의 단(step)에 의한 손실 수두

$$h_c = f_c \frac{V_2^2}{2g} + \frac{1}{2g}(V_2^2 - V_1^2)$$



여기서, f_c : 단면 축소에 의한 손실계수

V_1 : 단면 상류측의 유속

V_2 : 단면 하류측의 유속

3) 교각에 의한 손실 수두(교각 상류측에 생기는 배수고)

* d'Aubuisson 실험 공식 : 배수고 h_p

$$h_p = \frac{Q^2}{2g}\left[\frac{1}{C^2 b_2^2 (H_1 - h_p)^2} - \frac{1}{b_1^2 H_1^2}\right]$$

여기서, Q : 유량

b_1 : 교각 직전의 수로 폭

b_2 : 수로 폭에서 전교각 폭을 뺀 폭, $b_1 = b_1 - \sum t$

H_1 : 교각 상류측의 수심

C : 교각의 단면 형상 계수

* Yarnell 실험식 : 배수고 h_p

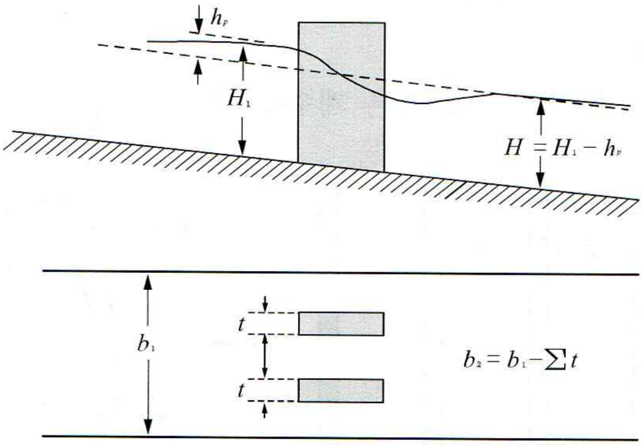
$$h_p = KHF_{r2}^2(K + F_{r2}^2 - 0.6)(a + 15a^4)$$

여기서, K : Yarnell의 교각 형상계수

H : 교각 하류의 정상 수심

F_{r2} : 교각 하류 정상 수심에서의 Froude수

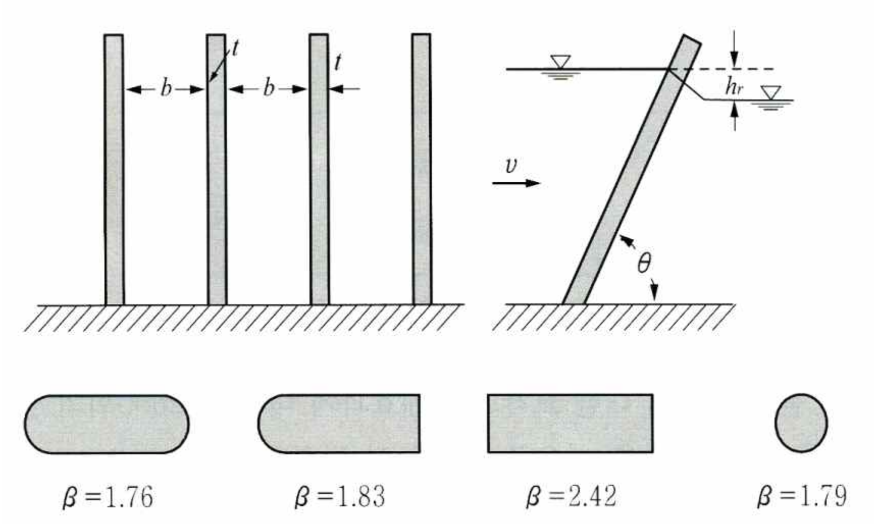
a : 수로 수축비, $a = 1 - \frac{b_2}{b_1}$



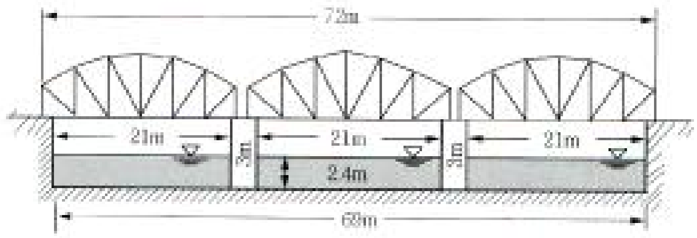
4) 스크린(svreen)에 의한 손실수두

$$h_r = \beta \sin\theta (\frac{t}{b})^{\frac{3}{4}} \frac{V^2}{2g}$$

여기서, θ : 스크린의 경사각
b : 스크린의 눈금 크기
t : 스크린의 두께
β : 스크린 단면 형상 계수



예제 5.13 폭 69m의 하천에 교량을 가설하기 위하여 두께 3m의 교각 2기를 설치했을 때 교각 상류측의 배수고를 구하라. 단, 이 하천의 유량은 450㎥/sec, 수심은 2.4m이며, 교각의 단면 형상계수는 0.93이다.



(풀이) 1) d'Aubuisson 식

$$b_2 = b_1 - \sum t = 69 - 3 \times 2 = 63m$$

$$h_p = \frac{Q^2}{2g}[\frac{1}{C^2 b_2^2 (H_1 - h_p)^2} - \frac{1}{b_1^2 H_1^2}]$$

$$h_p = \frac{450^2}{2 \times 9.8}[\frac{1}{0.93^2 \times 63^2 \times (2.4 - h_p)^2} - \frac{1}{69^2 \times 2.4^2}$$

시산법으로 $h_p = 0.20m$

2) Yarnell 식

배수고를 0.2m로 가정하면 하류정상 수심은 H=2.2m이고,
또, 단면 형상 계수를 K=1.05라 하면

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{450}{69 \times 2.2} = 2.964 m/\sec$$

$$F_{r2} = \frac{V}{\sqrt{gH}} = \frac{2.964}{\sqrt{9.8 \times 2.2}} = 0.638$$

$$a = 1 - \frac{b_2}{b_1} = 1 - \frac{63}{69} = 0.087$$

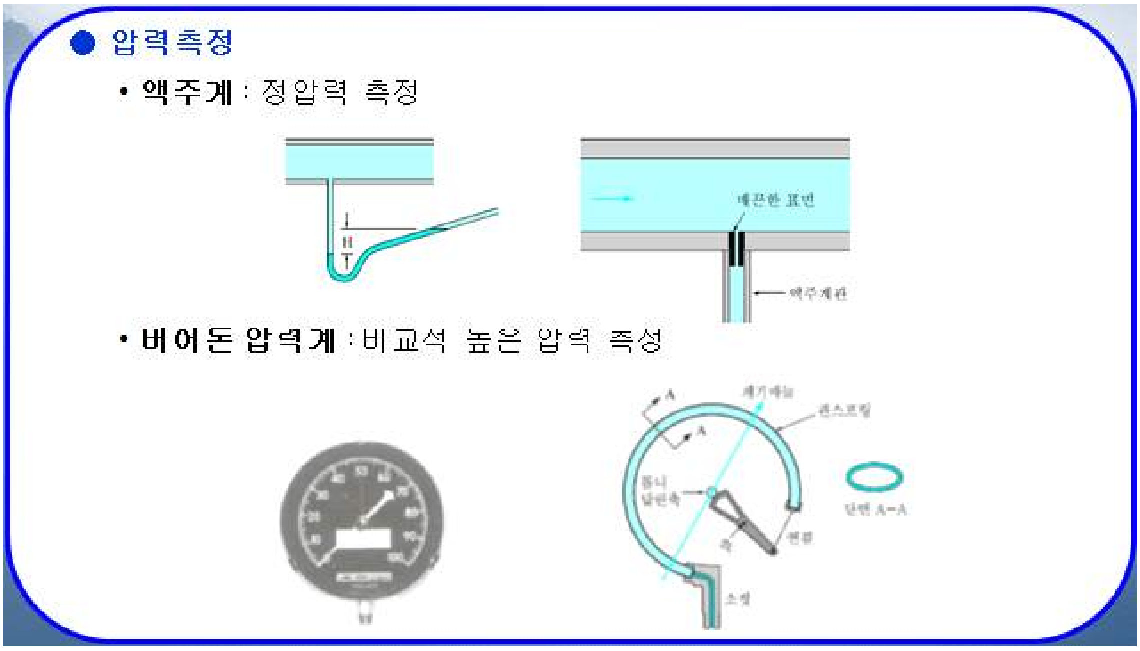
$$h_p = KHF_{r2}^2 (K + F_{r2}^2 - 0.6)(a + 15a^4)$$

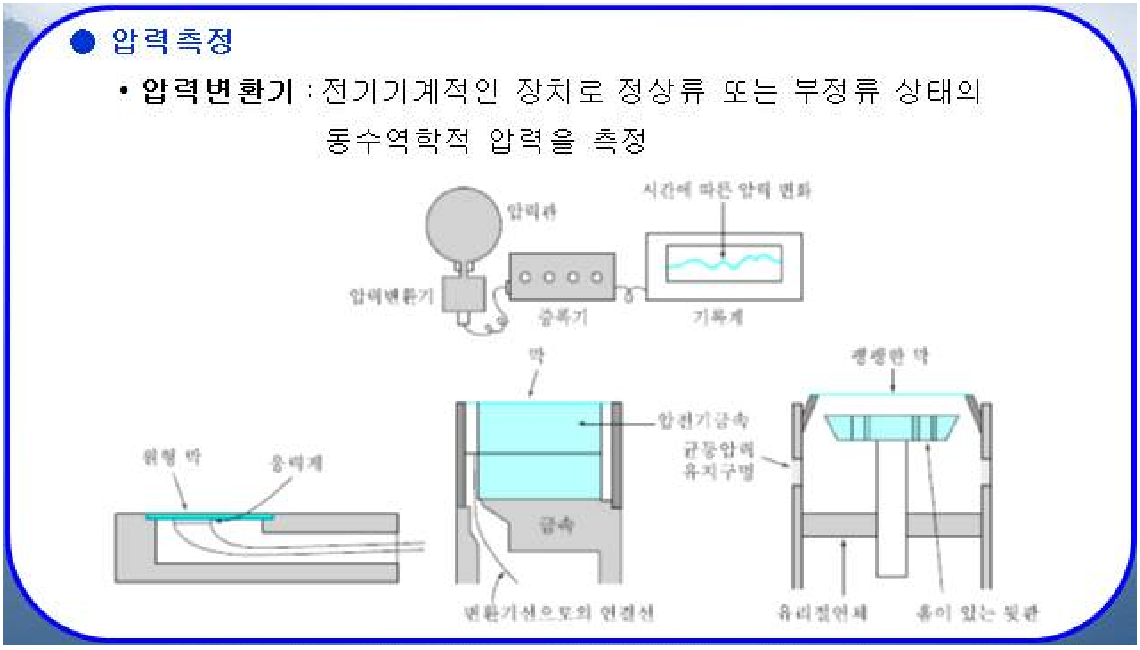
$$h_p = 1.05 \times 2.2 \times 0.638^2 (1.05 + 5 \times 0.638^2 - 0.6)(0.087 + 15 \times 0.087^4)$$
$$= 0.205m$$

제6장　수류의 계측

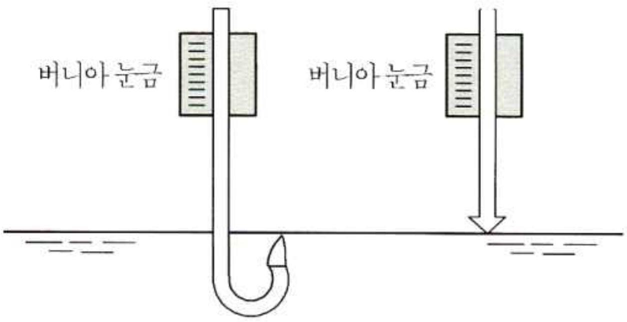
6.1 수압 및 수위의 측정

(1) 수압계

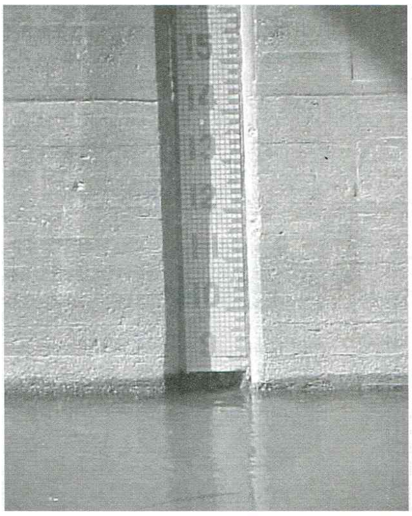


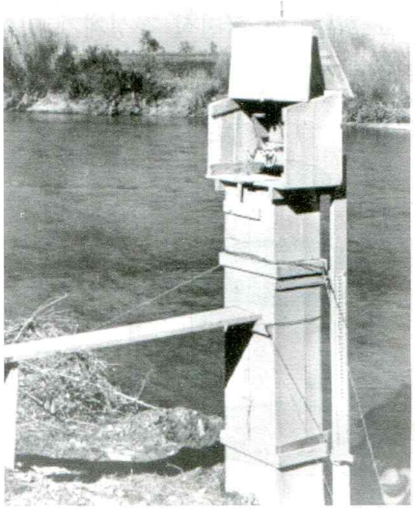


(2) 수면계



(a) hook gage (b) point gage



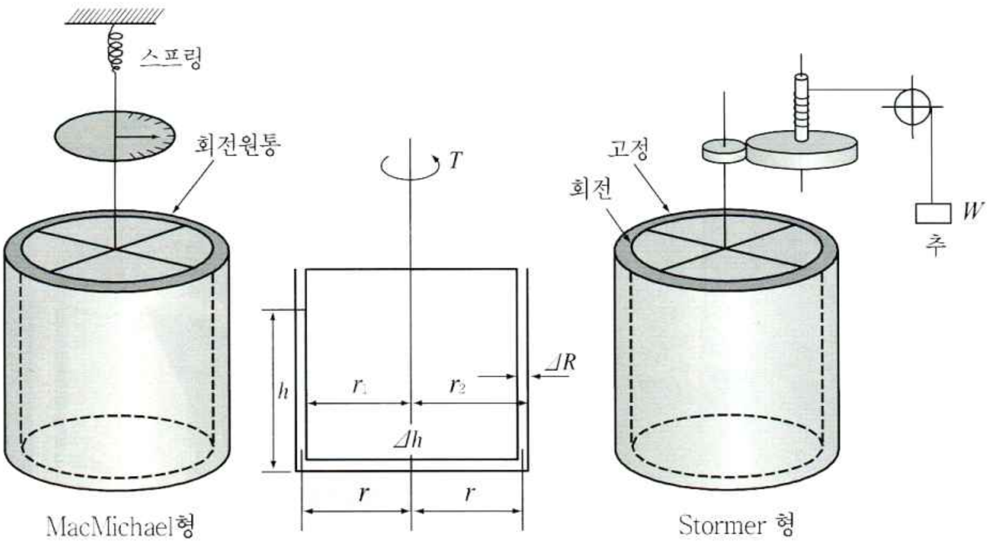


(3) 점성측정

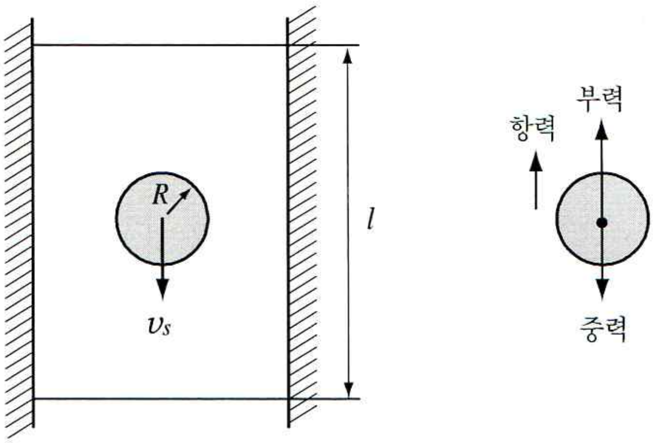
Hagen-Poiseuille 법칙:

$$\mu = \frac{\pi w_0 h}{128 Q l} D^4$$

MacMichael 및 Stormer형 점도계 :



Stokes 법칙 :



$$\sum F = \rho_s g \frac{4}{3}\pi R^3 - \rho g \frac{4}{3}\pi R^3 - 6\pi v_s R\mu = 0$$

$$\mu = \frac{2}{9} g(\rho_s - \rho)\frac{R^2}{v_s}$$

$$v_s = \frac{l}{t}$$

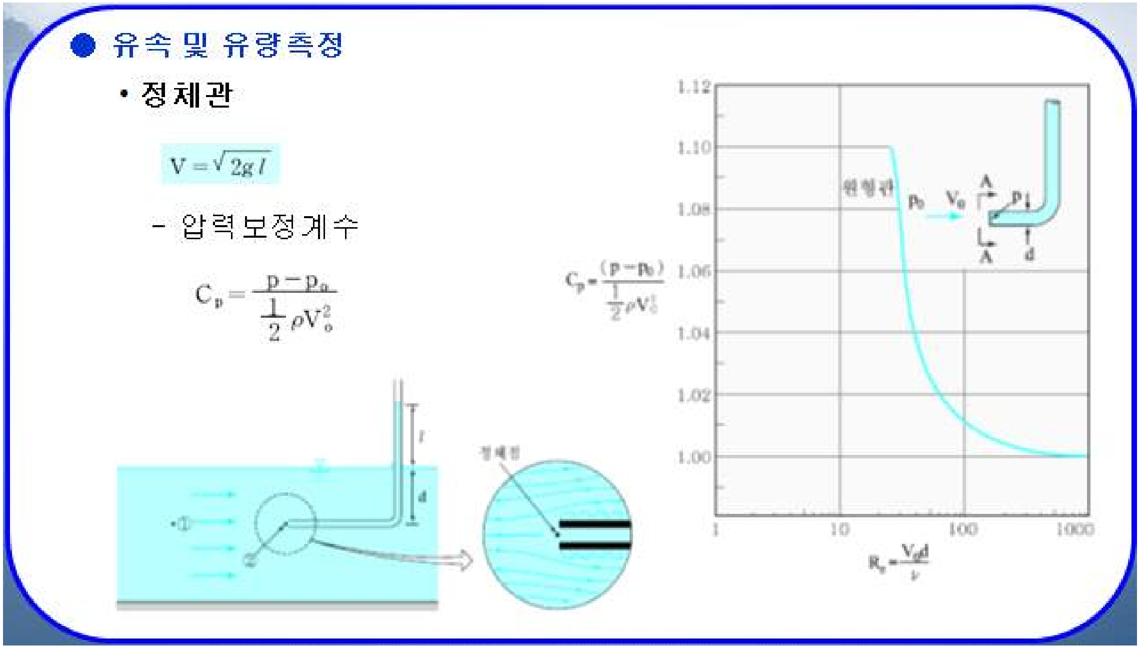
$$\mu = \frac{2}{9} g \frac{R^2}{K}(\rho_s - \rho)\frac{t}{l}$$

예제 6.1 납구식 점성계의 내경이 30cm, 낙하구의 직경이 6mm,비중이 1.50이다. 비중이 1.2인 유체의 점성계수를 측정하기 위해 낙하구를 투하한 후 30cm 낙하거리에 시간은 5초가 소요되었다. 이 유체의 점성계수는 얼마인가?

(풀이) $$\mu = \frac{2}{9} \times 9.8 \times \frac{0.003^2}{1.0}(1.5 - 1.2) \times 1000 \times \frac{5}{0.3} = 0.098 kg \bullet \sec/m^2$$

6.2 유속 및 유량 측정

1) 피토관 유속계



예제 6.2 하천수 중에 피토관을 세웠더니 피토관속의 수면이 하천수면보다 20cm높아졌다. 유속을 계산하라.

(풀이) $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 9.8 \times 0.2} = 1.98 m/\sec$

2) 프로펠라 유속계(군산대학교 수리실험실)

프로펠라 유속공식은 다음과 같다. 단, N은 회전수(RPS)이고, a,b는 유속계에 따른 검정 상수이다.

$V = aN + b$ (m/sec)

예제 6.3 프로펠라 유속계 검정결과가 다음과 같을 때 유속계의 유속공식을 구하라
유속공식은 $v = aN + b$이다.

v(m/sec)	0.215	0.195	0.139	0.035	0.024
N(rps)	0.969	0.890	0.613	0.095	0.051

(풀이) 관측결과로부터 관측식은 다음과 같다.

$$0.215 = 0.969a + b$$

$$0.195 = 0.890a + b$$

$$0.139 = 0.613a + b$$

$$0.035 = 0.095a + b$$

$$0.024 = 0.051a + b$$

최소자승법으로 1차함수의 계수를 구하는 규정식은

$$(\sum nn)a + (\sum n)b = \sum(nv)$$

$$(\sum n)a + mb = \sum v$$

이다. 단, m은 관측횟수이다.

횟수	n	v	nn	nv
1	0.969	0.215	0.939	0.208
2	0.890	0.195	0.792	0.174
3	0.613	0.139	0.376	0.085
4	0.095	0.035	0.009	0.003
5	0.051	0.024	0.003	0.001
Σ	2.618	0.608	2.119	0.471

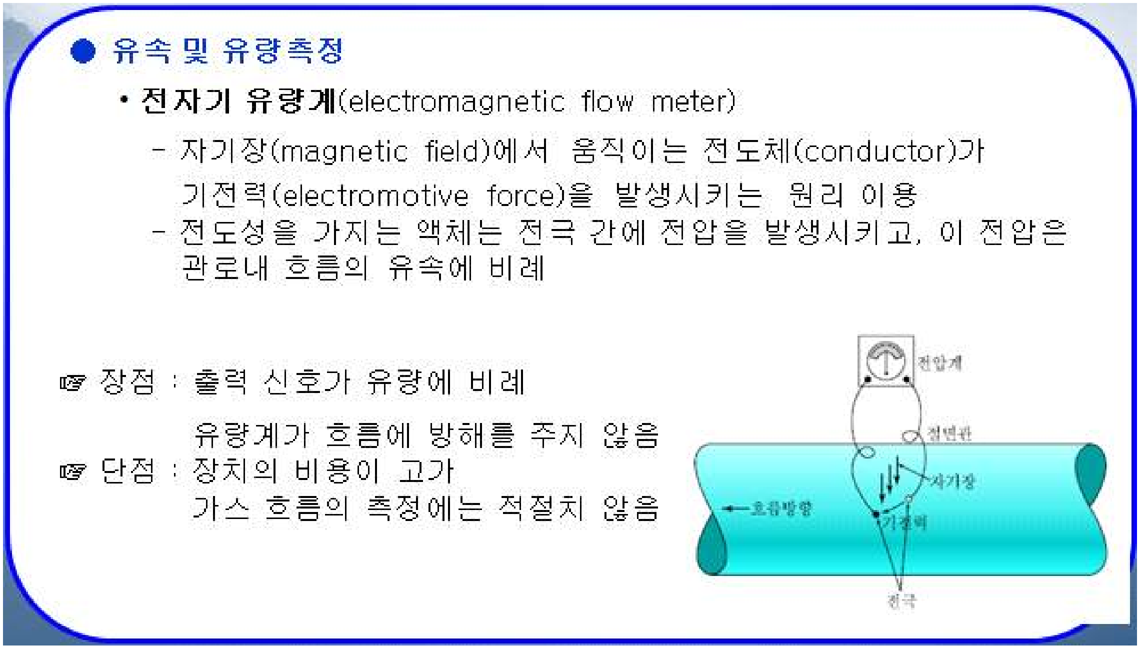
$$2.119a + 2.618b = 0.471$$

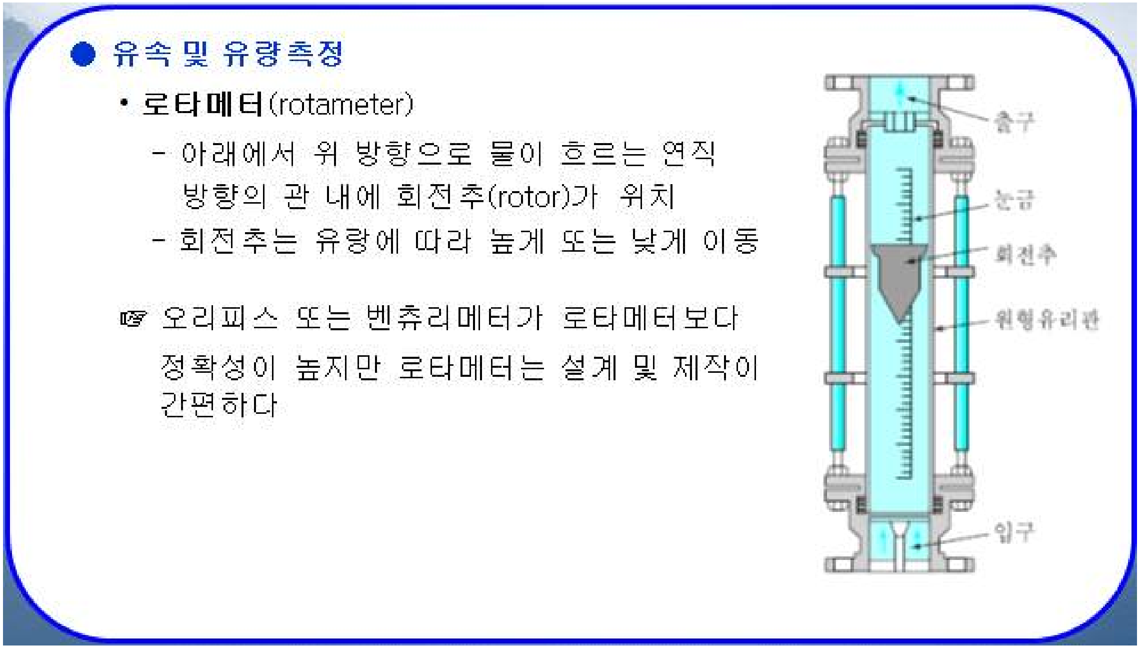
$$2.618a + 5b = 0.608$$

$$a = 0.204, \quad b = 0.015$$

따라서

$$v = 0.204N + 0.015\ (m/\sec)$$





6.3 오리피스(orifice)

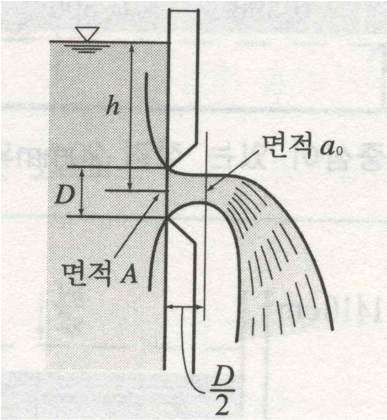
수조의 측벽이나 바닥에 구멍을 뚫어서 물을 유출시킬 때 이 구멍을 말함.

= 종류 =

1. 작은 오리피스(Small orifice)
2. 큰 오리피스(Large orifice)
   직사각형, 원형
3. 수중 오리피스(Submerged orifice)
   완전 수중 오리피스
   불완전 수중 오리피스

1). 작은 오리피스(Small orifice)

오리피스의 위,아래점의 수두차(압력차)가 작아서 동일하다고 볼 수 있는 오리피스 $(h > 5D)$



유속은 토리첼리 정의에 의해

$v = \sqrt{2gh}$

실제는 $v = C_v\sqrt{2gh}$ C_v : 유속계수 ($\frac{실제유속}{이론유속}$ = 0.95 - 0.99)

수축계수 : $\frac{a_0}{a} = C_a$ $\Rightarrow$ 0.60 - 0.66

유량은

$Q = a \cdot C_a{}^* C_v\sqrt{2gh}$

$C_v \bullet C_a = C$: 유량계수

$Q = Ca\sqrt{2gh}$ (작은 오리피스 유량공식)

예제 6.4 수면에서 오리피스 중심까지 3m이고 지름이 2cm인 표준오리피스로 유출할 때 수축단면의 지름이 1.5cm 였다. 오리피스 유량을 구하라. 단 유속계수는 0.98이다.

(풀이) $C_a = \frac{a_0}{a} = \frac{\pi/4 \times 0.15^2}{\pi/4 \times 0.02^2} = 0.563$

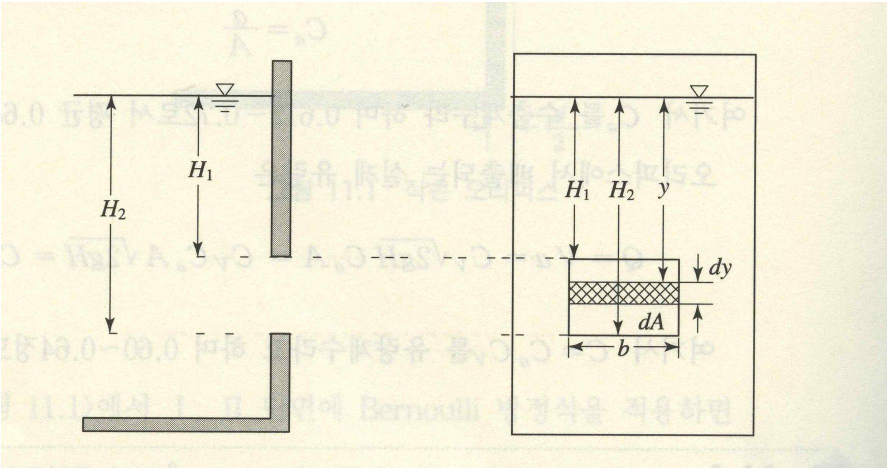
$$Q = Ca\sqrt{2gH} = C_aC_va\sqrt{2gH} = 0.563 \times 0.98 \times (\frac{\pi}{4} \times 0.02^2)\sqrt{2 \times 9.8 \times 3}$$

$$= 1.692 \times !0^{-3} m^3/\sec = 1.692 l/\sec$$

2). 큰 오리피스(Large orifice)

오리피스 상하 점의 수두차가 큰 경우

(1) 직사각형 큰 오리피스



미소단면 $dA = bdy$를 통과하는 유량을 dQ라 하면

$$dQ = Cbdy\sqrt{2gy}$$

유량계수 C 가 전단면에 대하여 일정하다고 가정하고 위의 식을 적분한다.

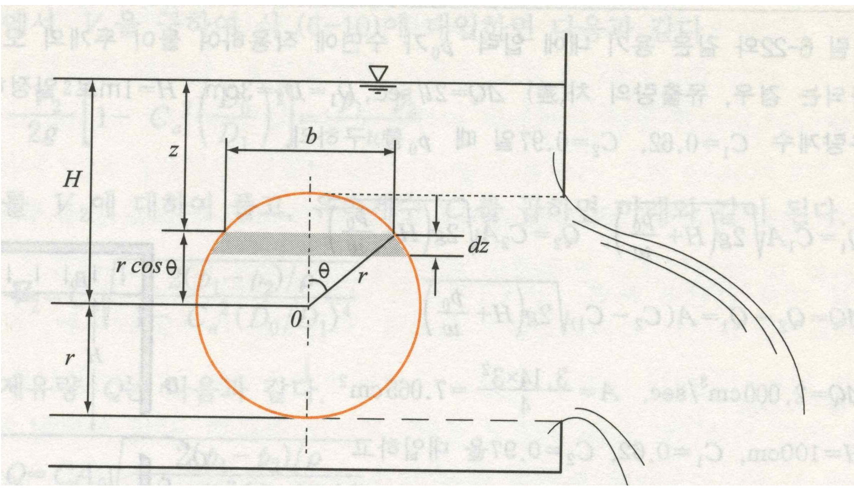
$$Q = \int_{H_1}^{H_2} Cbdy\sqrt{2gy}$$

$$= Cb\sqrt{2g}\int_{H_1}^{H_2} y^{\frac{1}{2}}dy$$

$$= Cb\sqrt{2g}\left[\frac{2}{3}y^{3/2}\right]_{H_1}^{H_2}$$

$$Q = \frac{2}{3}Cb\sqrt{2g}\left(H_2^{3/2} - H_1^{3/2}\right)$$ (사각형 큰 오리피스 유량공식)

(2) 원형 큰 오리피스



미소단면 $dA=bdz$를 통과하는 유량은 dQ라 하면

$$dQ=dA \cdot v_z \qquad v_z=\sqrt{2gz}$$

$$dQ=Cbdz\sqrt{2gz} \text{ --- ①}$$

$$b=2rsin\theta,\ z=H-rcos\theta,\ dz=rsin\theta d\theta \text{ --- ②}$$

①식에 ②식들을 대입하면

$$dQ=C2rsin\theta rsin\theta d\theta\sqrt{2g(H-rcos\theta)}$$

$$=2Cr^2\sin^2\theta d\theta\sqrt{2gH(1-\frac{r}{H}cos\theta)}$$

계수 C는 일정하다. ①식을 적분한다.

$$Q=\int_0^{\pi}2Cr^2\sin^2\theta d\theta\sqrt{2gH(1-\frac{r}{H}cos\theta)}$$

$$=2Cr^2\sqrt{2gH}\int_0^{\pi}\sin^2\theta(1-\frac{r}{H}cos)^{\frac{1}{2}}d\theta$$

Tayler의 급수 전개하여 계산하면

$$Q=C\pi r^2\sqrt{2gH}[1-\frac{1}{32}(\frac{r}{H})^2+\frac{5}{1024}(\frac{r}{H})^4\cdots]$$

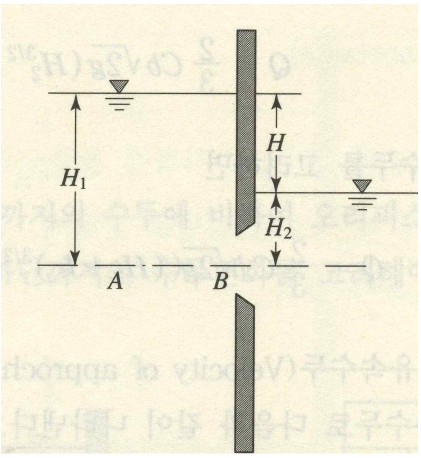
$$=C\pi r^2\sqrt{2gH}\left[1-\frac{1}{32}(\frac{r}{H})^2\right]$$ (원형큰 오리피스 유량공식)

3) 수중 오리피스(Submerged orifice)

오리피스에서의 유출수가 수중으로 들어가는 경우

① 완전 수중 오리피스

오리피스의 전단면이 수중에 있을 때



A, B 두점에 베루누이정리를 적용하면

$$H_1 = H_2 + \frac{V_B^2}{2g}$$

$$V_B = \sqrt{2g(H_2 - H_1)}$$

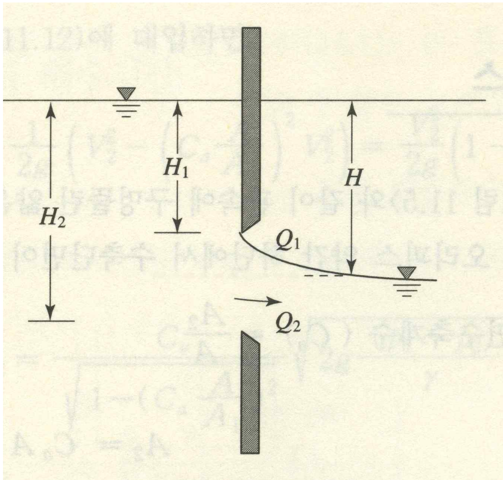
유량은

$$Q = Ca\sqrt{2gH}$$

* 대기 중으로 분출시 보다 약 2%가 감소한다.

$C =$ 0.60 - 0.62사용

② 불완전 수중 오리피스



$$Q_1 = \frac{2}{3} C_1 b \sqrt{2g}\,(H^{3/2} - H_1^{3/2})$$

$$Q_2 = C_2 b (H_2 - H)\sqrt{2gH}$$

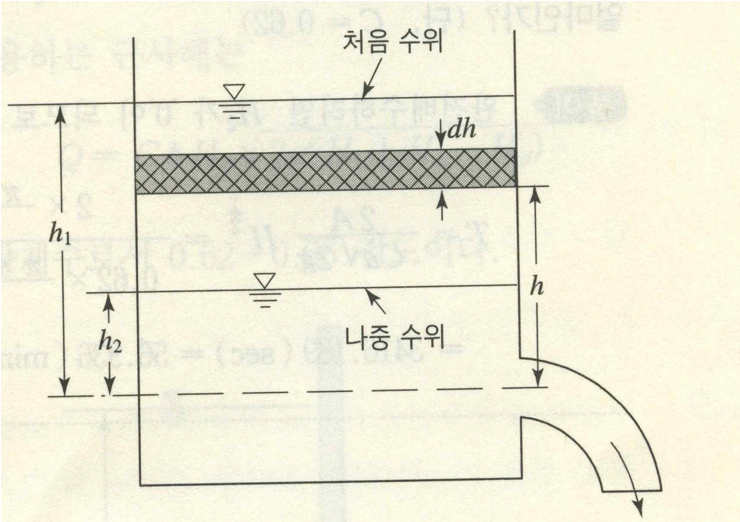
$$Q = Q_1 + Q_2$$

여기서도

$C_1 =$ 0.62, $C_2 =$ 0.53을 사용한다.

4) 오리피스의 유출 시간

A. 대기 중에 유출시킬 때



A : 수면적

a : 오리피스 단면적 h : 임의 수위차

$Q = Ca\sqrt{2gh}$

dt 시간 동안 유출량을 dQ라 하면

$dQ = Ca\sqrt{2gh}\,dt$--- ①

이 때 수면이 dh 만큼 강하하였다면

$dQ = -Adh$ --- ② (- : 수면강하를 의미)

여기서 ①식과 ②식은 같으므로

$Ca\sqrt{2gh}\,dt = -Adh$

$$\therefore dt = -\frac{A}{Ca\sqrt{2gh}}dh \quad \text{---} \ ③$$

수심을 h_1에서 h_2까지 강하시키는데 걸리는 시간은 ③식을 적분한다.

$$T = \int_{h_2}^{h_1} -\frac{A}{Ca\sqrt{2gh}}dh \quad = \frac{A}{Ca\sqrt{2g}}\int_{h_2}^{h_1} h^{-1/2}dh$$

$$= \frac{A}{Ca\sqrt{2g}}[2h^{1/2}]_{h_2}^{h_1}$$

$$T = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}}(h_1^{1/2} - h_2^{1/2})$$

또 완전 배수($h_2 = 0$)시키는데 요하는 시간은

$$T = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}}h_1^{1/2}$$

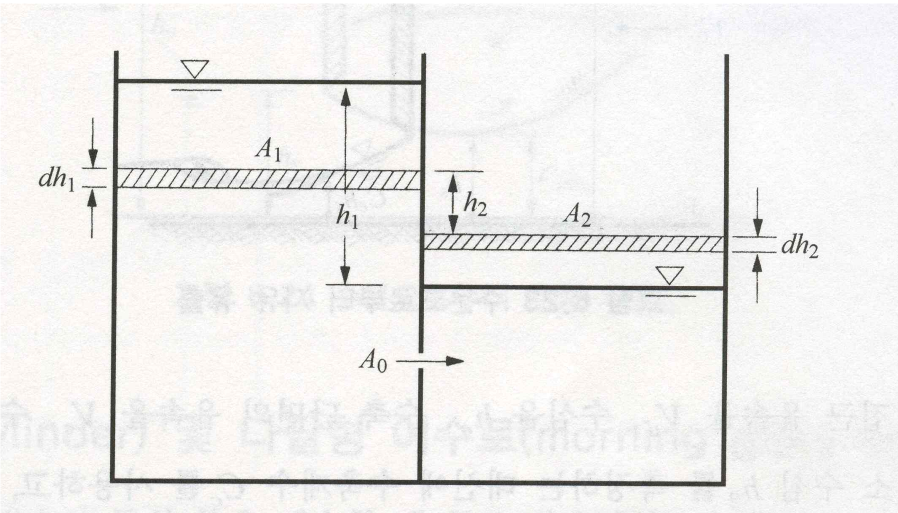
예제 6.5 깊이 5m, 밑면적이 8m^2을 갖는 수조의 측벽 수심이 5.0m인 지점에 직경 0.2m의 오리피스가 설치되어 있다. 완전배수시간을 구하여라. 단 유량계수는 0.65로 한다.

(풀이)

$$T = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}} h_1^{1/2} = \frac{2 \times 8}{0.65 \times \dfrac{3.14 \times 0.2^2}{4} \sqrt{2 \times 9.8}} \times 5^{1/2}$$

$$= 359.9 \simeq 360\sec = 6\min$$

B. 수중으로 유출하는 경우(水中 오리피스)



A_1, A_2 : (Ⅰ), (Ⅱ) 탱크의 수면적

dt시간 동안에 두 수조간 임의 수위차 h에 대한 이동유량을 dQ라 하면

$dQ = Ca\sqrt{2gh}\,dt$ --- ①

이로 인하여 수위차 변화는

(Ⅰ) 탱크 수위는 dh_1만큼 감소

(Ⅱ) 탱크 수위는 dh_2만큼 감소

이 때 전수두차 변화 dh는

$dh = dh_1 + dh_2$ 만큼 감소된다

$dh_1 = dh_2 - dh$ --- ②

연속방정식에서

$dQ = A_1 dh_1 = A_2 dh_2$

$dh_2 = A_1/A_2 \bullet dh_1$

이것을 ②식에 대입하면

$dh_1 = dh - A_1/A_2 \bullet dh$

$dh_1(1 + A_1/A_2) = dh$

$$dh_1 = \frac{A_2}{A_1 + A_2} dh$$

dt시간동안 (I)수조의 체적감소는

$dQ = -A_1 dh_1$

$$dQ = -\frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} dh \text{ --- ③}$$

①식 = ③식 이므로

$$Ca\sqrt{2gh}\,dt = -\frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} dh$$

$$\therefore \ dt = -\frac{A_1 A_2}{Ca\sqrt{2gh}\,(A_1 + A_2)} dh \text{ --- ④}$$

처음 수위차 h_1에서 h_2까지 감소시키는데 걸리는 시간은 ④식을 적분한다.

$$T = \int_{h_1}^{h_2} -\frac{A_1 A_2 dh}{Ca\sqrt{2gh}\,(A_1 + A_2)}$$

$$= \frac{A_1 A_2}{Ca\sqrt{2g}\,(A_1 + A_2)} \int_{h_2}^{h_1} \frac{1}{\sqrt{h}} dh$$

$$= \frac{A_1 A_2}{Ca\sqrt{2g}\,(A_1 + A_2)} \int_{h_2}^{h_1} h^{-\frac{1}{2}} dh$$

$$= \frac{A_1 A_2}{Ca\sqrt{2g}\,(A_1 + A_2)} [2h^{\frac{1}{2}}]_{h_2}^{h_1}$$

$$T = \frac{2A_1 A_2}{Ca\sqrt{2g}\,(A_1 + A_2)} (h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}})$$

① 두 수조의 수면이 일치할 때 걸리는 시간

$h_2 = 0$이므로

$$T = \frac{2A_1 A_2}{Ca\sqrt{2g}\,(A_1 + A_2)} h_1^{\frac{1}{2}}$$

② 바다에서 갑실(dock)로 물을 유입시킬 때 걸리는 시간

$A_1 = \infty$ 이므로 $\dfrac{A_2}{A_1} \to 0$

$$T = \frac{2A_2}{Ca\sqrt{2g}}(h_1^{\frac{1}{2}} - h_2^{\frac{1}{2}})$$

예제 6.6 길이 50m, 폭 30m의 직립벽을 가진 갑실(Dock)에 물을 채우기 위해 폭 1.5m의 오리피스를 설치했다. 갑실과 해면과의 수위차가 2.5m 일 때 갑실에 10분 동안 물을 채우기 위해서는 오리피스의 높이는 얼마로 해야 하는가? (단C = 0.63)

(풀이) $T = \frac{2A}{Ca\sqrt{2g}}(h_1^{1/2} - h_2^{1/2})$

$$600 = \frac{2 \times 50 \times 30}{0.63 \times 1.5 \times h\sqrt{2 \times 9.8}} \times 2.5^{\frac{1}{2}}$$

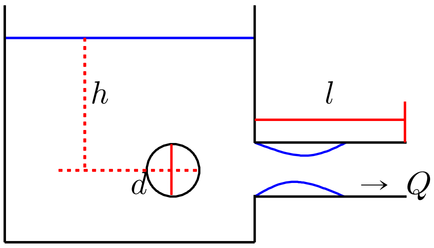
$$\therefore\ h = 1.88m$$

5) 단관과 노즐(nozzle)

A. 단관(short tube)

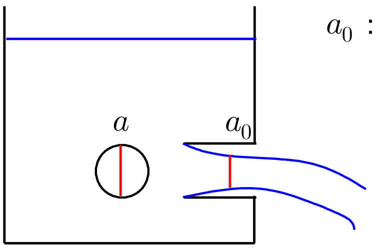
오리피스에 붙인 짧은 관

- 표준단관, 보르다(borda) 단관 : C=0.55
- 표준단관(standard short tube) : C=0.85



l = 2 - 3d인 관을 말함

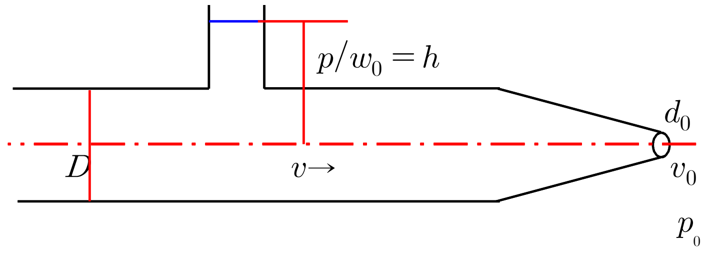
- 보르다(borda) 단관



a_0 : 1/2a인 관을 말함

B. 노즐(nozzle)

호스의 선단에 달아 물을 멀리 사출할 목적으로 만든 점축관



관과 노즐 사이에 베르누이 정리를 적용하면

$$\frac{v^2}{2g}+\frac{p}{\omega_0}+z=\frac{v_0^2}{2g}+\frac{p_0}{\omega_0}+z_0$$

* 노즐에서는 모든 수두(압력수두)를 속도수두로 변환시킨다.

$$\frac{v^2}{2g}+h=\frac{v_0^2}{2g}$$

$$\therefore\ v_0=\sqrt{2g\left(h+\frac{v^2}{2g}\right)}\ \text{---}\ ①$$

연속방정식에서

$$Q=Av=a_0v_0$$

$$\frac{\pi D^2}{4}v=\frac{\pi d_0^2}{4}v_0$$

$$\therefore\ v=\frac{d_0^2}{D^2}v_0$$

이것을 ①식에 대입하면(유속계수 C_v라 하면)

$$v_0=C_v\sqrt{2g\left[h+\frac{1}{2g}\left(\frac{d_0^2}{D^2}\right)^2\right]v_0^2}$$

양변을 제곱하여 정리하면

$$v_0^2=C_v^2 2gh+C_v^2\left(\frac{d_0^2}{D^2}\right)^2v_0^2$$

$$v_0^2\left[1-C_v^2\left(\frac{d_0^2}{D^2}\right)^2\right]=C_v^2 2gh$$

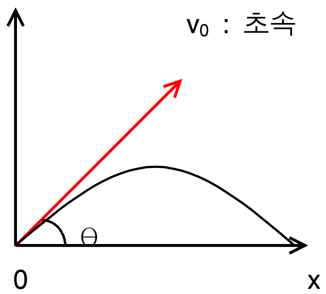
이때 $\dfrac{d_0^2}{D^2}=m$ 이라하면

$$v^2(1-C_v^2m^2)=C_v^2 2gh$$

$$v_0=C_v\sqrt{\frac{2gh}{1-m^2C_v^2}}\quad \text{(노즐의 분출속도)}$$

또는 $v_0 = C_v \sqrt{\dfrac{2gh}{1 - C_v^2 (\dfrac{d_0}{D})^4}}$

= 사출수(jet water)의 도달거리 =



θ로 사출하여 t_1시간 후에는

$x = v_0 \cos\theta t_1$ --- ①

$y = v_0 \sin\theta t_1 - 1/2 g t_1^2$ --- ②

$v = v_0 \sin\theta - g t_1$ --- ③

정점에서는 속도가 0이므로

③식은 $0 = v_0 \sin\theta - g t_1$

$t_1 = v_0 \sin\theta / g$ --- ④

$x(t) = v_0 t$

$y(t) = v_0 t - 1/2 g t^2$

$v(t) = v_0 - g t$

(1) 수평도달거리 : x

①식에 ④식을 대입하면

$x = 2 v_0 \cos\theta t_1$

$= 2 v_0 \cos\theta (v_0 \sin\theta / g)$

$= 2 v_0 \cos\theta \sin\theta / g$

여기서 $\cos\theta \sin\theta = \sin 2\theta / 2$

$$\therefore x = 2 \times \frac{v_0 \dfrac{\sin 2\theta}{2}}{g}$$

$$= 2 \times \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{2g}$$

$$= \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$

$$x = \frac{v_0^2 \sin 2\theta}{g}$$ (사출수의 수평 도달거리)

· 최대 수평 도달거리 : $x_{\max}$

$\theta = 45^\circ$ 일 때 이므로

$$x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin 90^0}{g}$$

$$= \frac{v_0^2}{g}$$

(1) 연직도달거리 : y

②식에 ④식을 대입하면

$$y = v_0 \sin\theta \frac{v_0 \sin\theta}{g} - \frac{1}{2} g \left(\frac{v_0 \sin\theta}{g}\right)^2$$

$$= \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{g} - \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2g}$$

$$y = \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2g}$$ (사출수의 연직도달거리)

· 최대 연직 도달거리 : $y_{\max}$

$\theta = 90^\circ$ 일 때 이므로

$$y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2\theta}{2g}$$

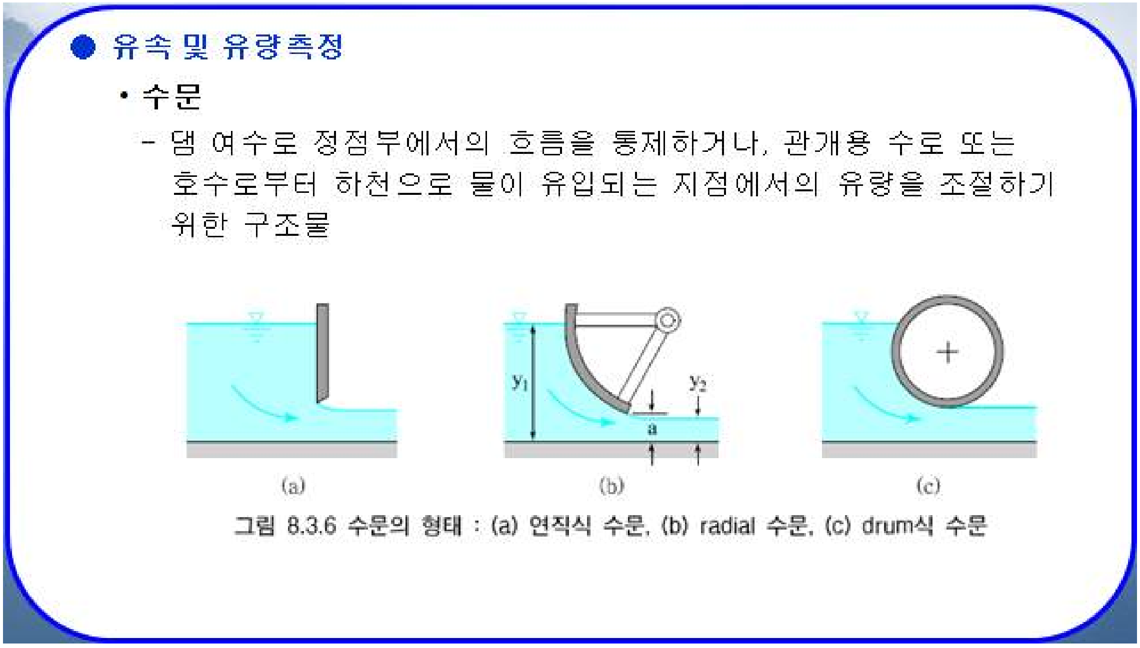
$$= \frac{v_0^2 (\sin 90^o)^2}{2g}$$

$$= \frac{v_0^2}{2g}$$

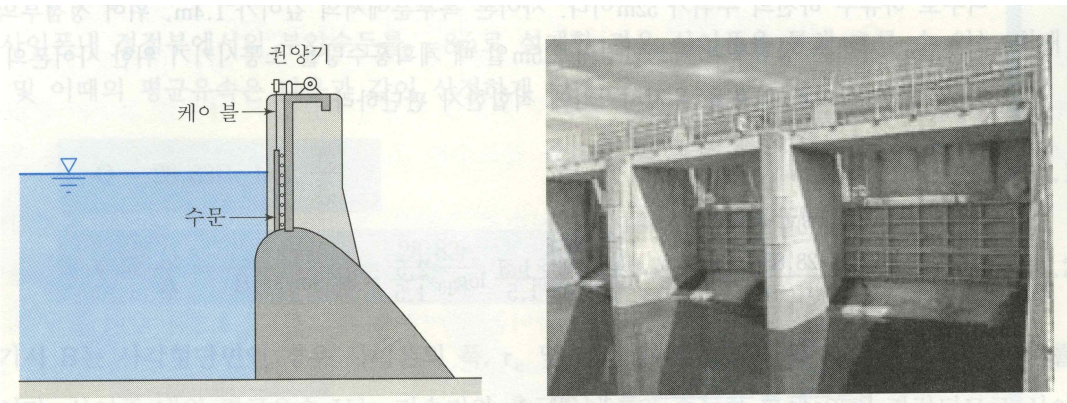
* 최대 수평도달거리($x_{\max}$)는 최대 연직도달거리($y_{\max}$)의 2배이다.

즉, $y_{\max} = \frac{1}{2} x_{\max}$

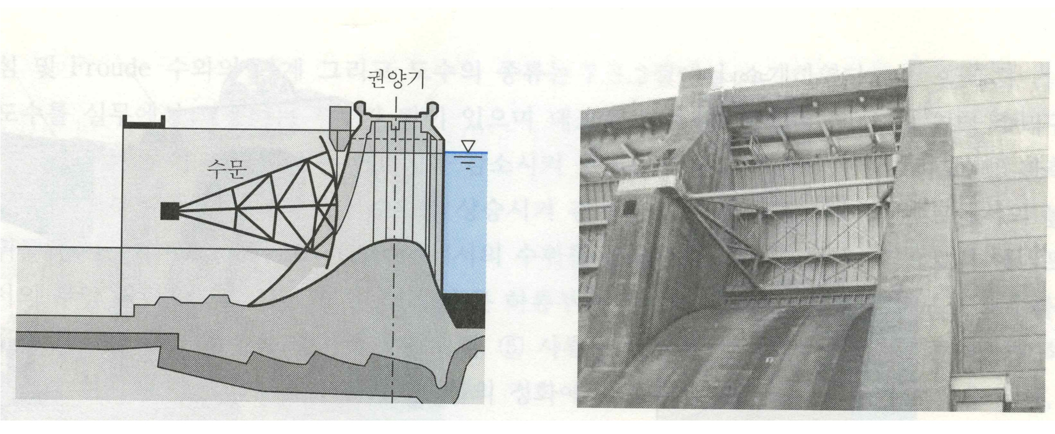
C. 수문(水門 : sluice gate)



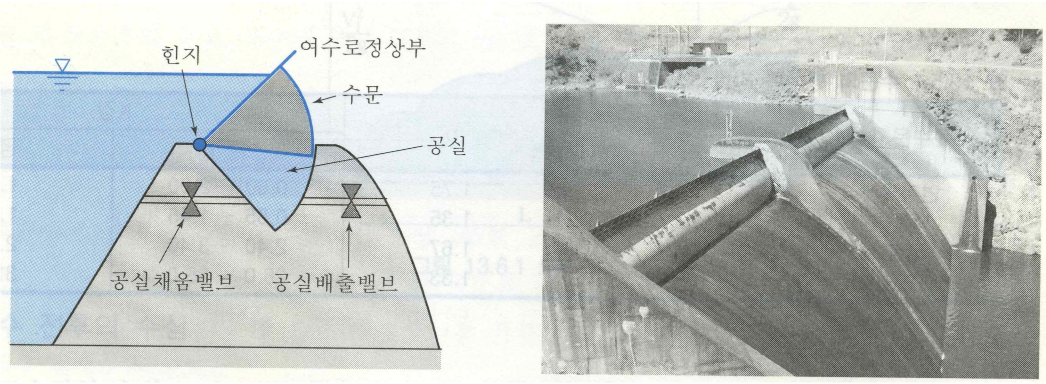
수문 유량은 오리피스 이론으로 구한다.



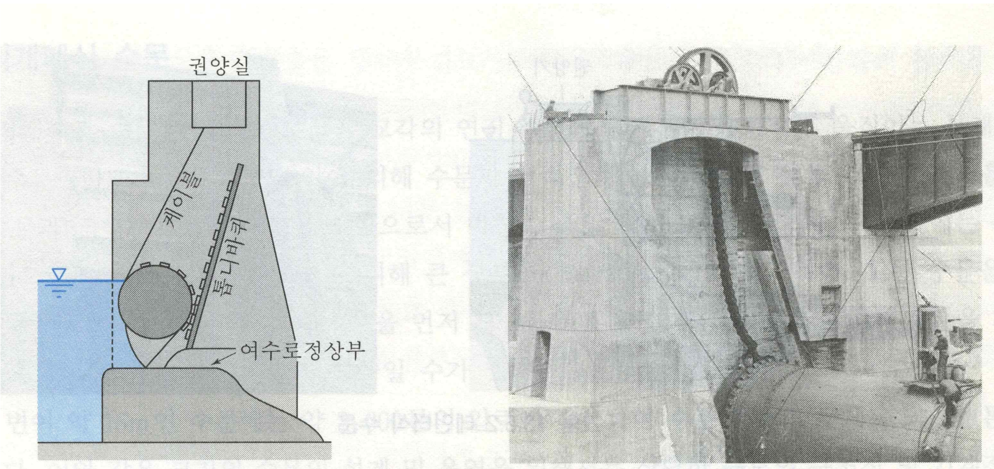
SLUICE 수문 구조 및 사진



RADIAL 수문 구조와 사진



DRUM 수문 구조 및 사진



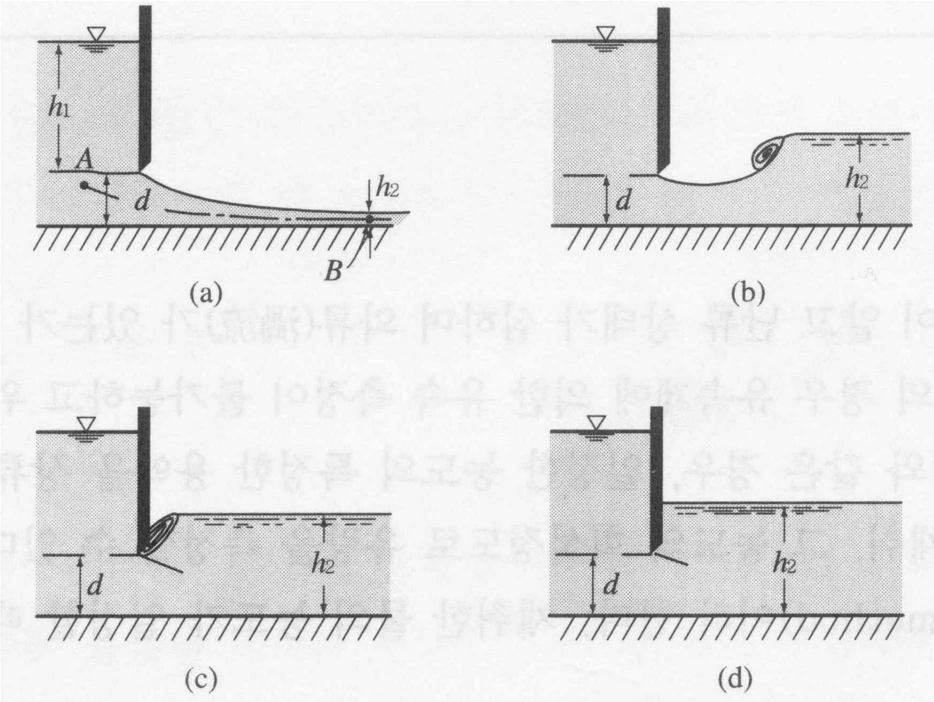
ROLLING 수문 구조와 사진

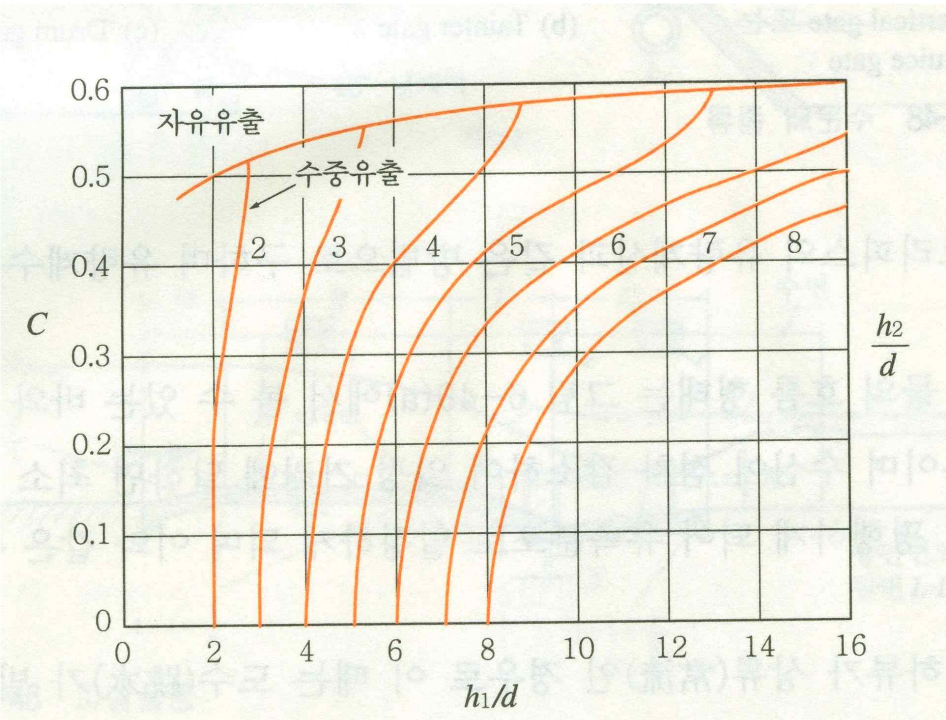
(1) 하류의 수위가 수문높이보다 낮을 때 **자유유출** 수문 유량 공식

$$Q = Cbd\sqrt{2gh_1}$$

(2) 하류의 수위가 수문높이 보다 높을 때 **수중유출** 수문유량공식

$$Q = Cbd\sqrt{2g\{(h_1 + d) - h_2\}}$$





예제 6.7 수문(sluice gate)의 개방도 1.0m, 수문폭 10m, 저면으로부터 측정한 수심 11m인 경우, 자유유출시의 유량을 구하라.

(풀이)

$$Q = Cbd\sqrt{2gh_1}$$

$$= 0.58 \times 1 \times 10 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times (11-1)}$$

$$= 81.2m^3/\sec$$

$\dfrac{h_1}{d} = 10$일 때 $Henry$ 실험 도표로부터 $C = 0.58$

예제 6.8 수문의 상류 수심이 3.5m, 하류 수심이 1.5m 일 때 6m^3/sec의 물을 얻으려면 수문의 폭이 2m 일 때 수문을 얼마나 올리면 되는가?(단, C=0.64)

(풀이) 수중유출로 가정하면 $Q = Cbd\sqrt{2g\{(h_1 + d) - h_2\}}$

$$6 = 0.64 \times 2d\sqrt{2 \times 9.8(3.5 - 1.5)}$$

$$\therefore d = 0.74m$$

6.4 웨어(weir)

수로를 횡단하여 설치한 장벽 위를 물이 월류할 때 이 장벽을 말함.

< 사용목적 >

(1) **유량측정**
(2) 취수를 위한 **수위증가**
(3) **분수**(分水)

< 웨어의 종류 및 용어>

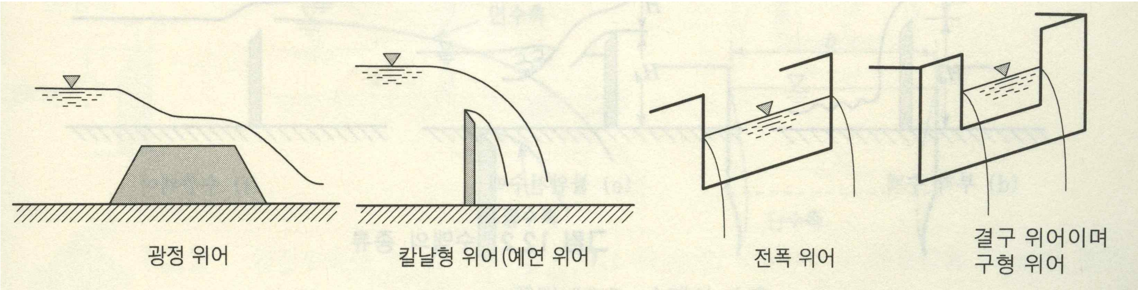
○예연웨어(sharp crested weir)　　결구(缺口)　(직각)삼각웨어
구형(직사각형)웨어
제형(사다리꼴)웨어

○광정웨어(broad crested weir)

○전폭(全幅)웨어

○수중웨어

◯횡웨어

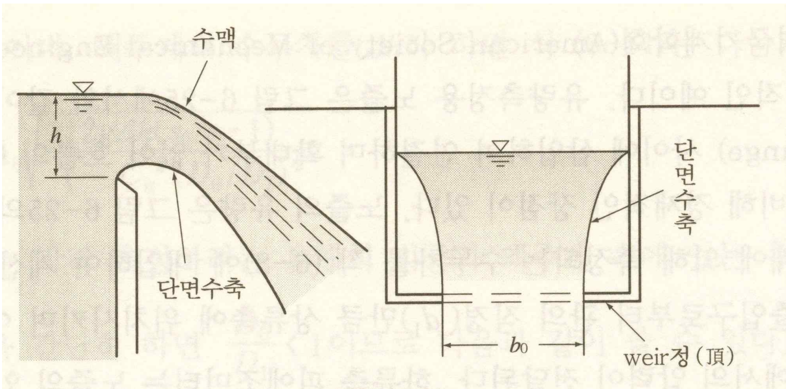


= 용어 =

· Notch(결구) : 장벽의 일부를 따낸 부분

· Nappe(수맥) : 장벽을 월류하는 물의 얇은 층

· End contraction(단수축) : 웨어의 양측에 종으로 벽을 설치하여 폭을 좁힐 때 측벽이 웨어의 구실을 하여 이때 수류가 수축한다.



= 월류 수맥의 종류 =

① 완전월류(수맥)

$h \le 0.4h_d$ 이며 h가 너무 작지 않을 때 완전월류가 생기며 수맥의 위,아래에 대기압이 작용한다.

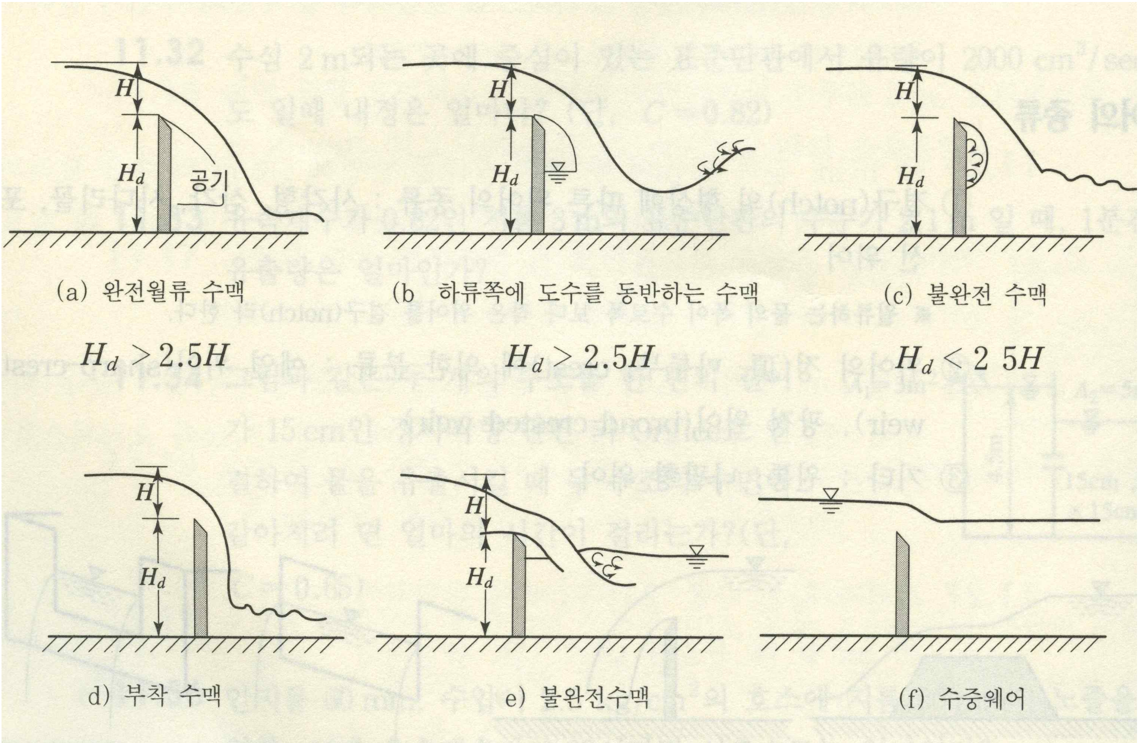
② 불완전월류(수맥)

$h > 0.4h_d$ 이며 하류수위가 언정보다 낮아도 측판과 수맥사이에 Vertex로 차며 수맥의 형이 불명료해진다.

③ 부착수면

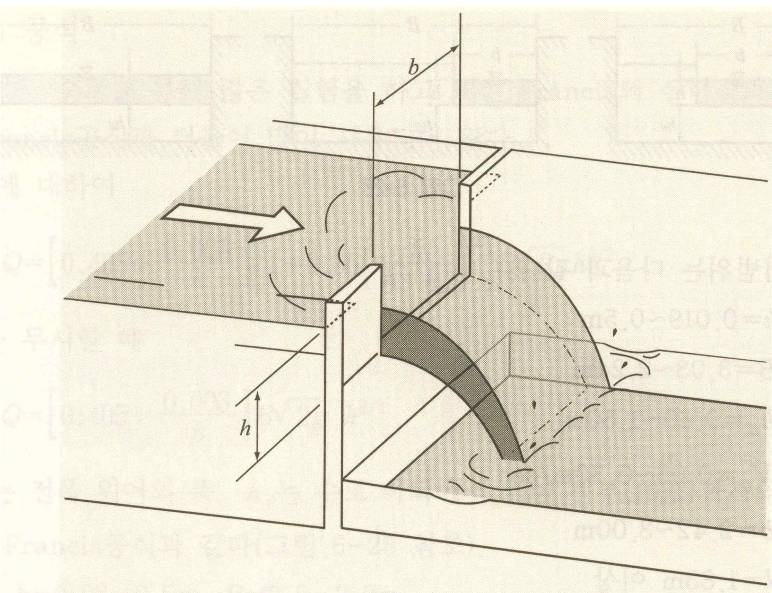
$h \ll 0.4h_d$이며 월류수의 평균유속이 약해 수맥을 하류의 벽면에 부착하여 낙하한다.

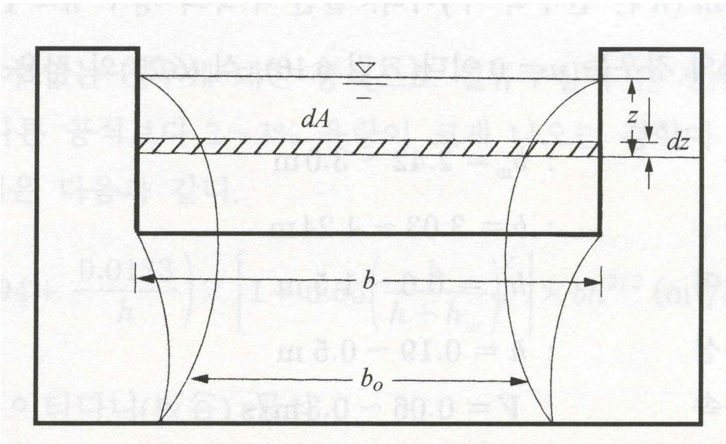
* 정확한 유량 측정은 수맥이 완전월류이어야 한다.



<웨어 유량공식>

[1] 직사각형 웨어(Rectangle weir)





수면에서 z 깊이의 점의 유속은

$$v_z = \sqrt{2gz}$$

또 미소단면적 $dA = bdz$를 통과하는 유량을 dQ 라 하면

$$dQ = dA \cdot v_z$$

$$dQ = b \cdot dz \cdot v$$

$$= b\sqrt{2g(z + \frac{v_a^2}{2g})}\, dz$$

이것을 전단면에 대하여 적분하면

$$Q = \int_0^h b\sqrt{2g(z + \frac{v_a^2}{2g})}\, dz$$

$$= b\sqrt{2g}\int_0^h (z + \frac{v_a^2}{2g})^{1/2} dz$$

$$= b\sqrt{2g}\,[\frac{2}{3}(z + \frac{v_a^2}{2g})^{\frac{3}{2}}]_0^h$$

$$= \frac{2}{3}b\sqrt{2g}\,[(h + \frac{v_a^2}{2g})^{\frac{3}{2}} - (\frac{v_a^2}{2g})^{\frac{3}{2}}]$$

웨어의 단면적에 대하여 수로의 단면적이 충분히 크다면 접근 유속은 무시한다.

즉 $v_a = 0$

$$Q = \frac{2}{3}b\sqrt{2g}\,h^{\frac{3}{2}}$$

$$Q = \frac{2}{3}Cb\sqrt{2g}\,h^{\frac{3}{2}}$$ (직사각형 웨어의 유량공식)

◎ Francis 사각형웨어 실험공식

$$Q = \frac{2}{3} Cb\sqrt{2g}\, h^{\frac{3}{2}} \text{에서 } C = 0.62 \text{ 사용}$$

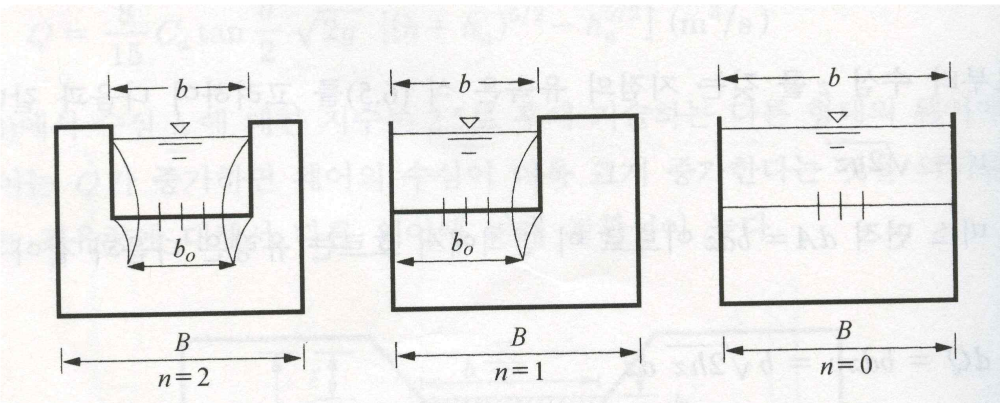
$$\frac{2}{3} C\sqrt{2g} = 1.84$$

$$Q = 1.84bh^{\frac{3}{2}}$$

그러나 단수축이 있는 경우에는 b 대신 다음 b_0를 사용한다.

$$b_0 = b - \frac{nh}{10}$$ n : 단수축수

$$Q = 1.84b_0h^{\frac{3}{2}}$$



예제 6.9 폭 1.9m의 웨어수조에 폭 75cm의 직사각형 웨어가 설치되어 있다. 월류수심이 20cm일 때 유량를 계산하라. 여기서 웨어높이는 1.3m이다.

(풀이)

(a) Francis공식

$$Q = 1.84(b - nh/10)h^{3/2}$$

$$= 1.84(0.75 - 2 \times \frac{0.2}{10}) \times 0.2^{3/2}$$

$$= 0.117m^3/\sec = 117l/\sec$$

b) Rehbock 공식

$$Q = (1.782 + 0.24\frac{h+0.0011}{h_d})b(h+0.0011)^{3/2}$$

$$= (1.782 + 0.24 \times \frac{0.2+0.0011}{1.3}) \times 0.75 \times (0.2+0.0011)^{3/2}$$

$$= 0.123m^3/\sec = 123l/\sec$$

(c) 이타다니, 데지마공식

$$C = 1.785 + \frac{0.00295}{h} + 2.237\frac{h}{hd} - 0.428\sqrt{\frac{(B-b)h}{Bh_d}} + 0.034\sqrt{\frac{B}{h_d}}$$

$$= 1.785 + \frac{0.00295}{0.2} + 2.237 \times \frac{0.2}{1.3} - 0.428\sqrt{\frac{(1.9-0.75) \times 0.2}{1.9 \times 1.3}} + 0.034\sqrt{\frac{1.9}{1.3}}$$

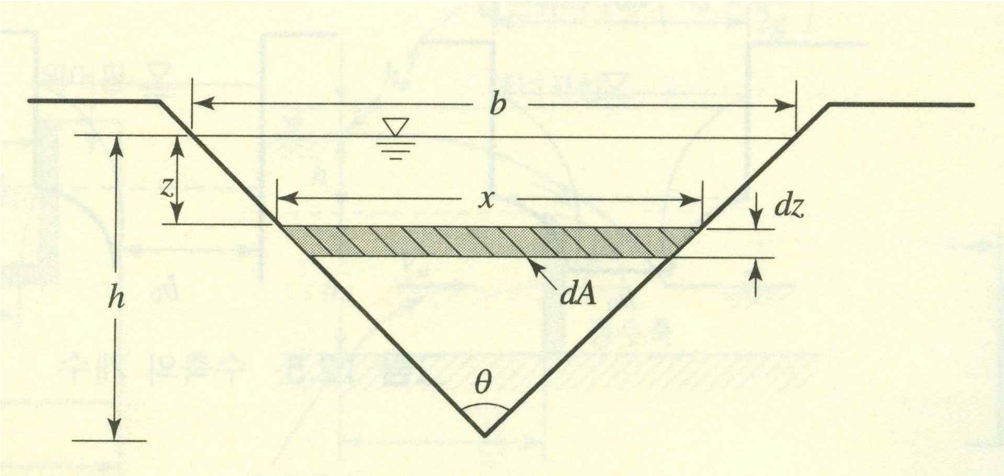
$$= 1.747$$

$$Q = Cbh^{3/2} = 1.747 \times 0.75 \times 0.2^{3/2}$$

$$= 0.117m^3/\sec = 117l/\sec$$

[2] 삼각웨어(triangular weir)

적은 유량의 변화에도 수두에 큰 차가 생겨 적은 유량 측정에 알맞고 $30l/\sec$ 이하의 유량에서는 직사각형 웨어보다 정확.



* 2등면 삼각형을 사용하고 $\theta =$ 90°인 것이 많음.

z 깊이 점의 유속을 $v = \sqrt{2gz}$

미소단면을 $dA = bdz$를 통과하는 유량을 dQ라 하면

$$dQ = bdz\sqrt{2gz}$$

$$= b\sqrt{2gz}\,dz \text{ --- ①}$$

$$b = 2(h-z)\tan\frac{\theta}{2}$$

이것을 ①식에 대입하면

$$dQ = 2(h-z)\tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2gz}\,dz$$

이것을 전단면에 대하여 적분하면

$$Q = \int_0^h 2(h-z)\tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2gz}\,dz$$

$$= 2\tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2g}\int_0^h (h-z)z^{\frac{1}{2}}dz$$

$$= 2\tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2g}\int_0^h (hz^{\frac{1}{2}} - z^{\frac{2}{3}})dz$$

$$= 2\tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2g}\,[\frac{2}{3}h^{\frac{3}{2}} - \frac{2}{5}z^{\frac{5}{2}}]_0^h$$

$$= 2\tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2g}\,(\frac{2}{3}h^{\frac{5}{2}} - \frac{2}{5}h^{\frac{5}{2}})$$

$$= \frac{8}{15}tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2g}\,h^{\frac{5}{2}}$$

실제는 유량은

$$Q = \frac{8}{15} C \tan\frac{\theta}{2} \sqrt{2g}\, h^{\frac{5}{2}}$$

$\theta = 90^\circ$ 일 때 $Q = 1.4 Ch^{\frac{5}{2}}$ (삼각웨어의 유량공식)

예제 6.10 월류수심이 20cm, 웨어의 각 90°를 갖는 삼각웨어 유량을 구하라. 단 유량계수는 0.7이다.

(풀이) $$Q = \frac{8}{15} C \tan\frac{\theta}{2} \sqrt{2g}\, h^{\frac{5}{2}}$$

$$= \frac{8}{15} \times 0.7 \times \tan\frac{90^0}{2} \times \sqrt{2 \times 9.8} \times 0.2^{\frac{5}{2}}$$

$$= 0.03 m^3/\sec = 30 l/\sec$$

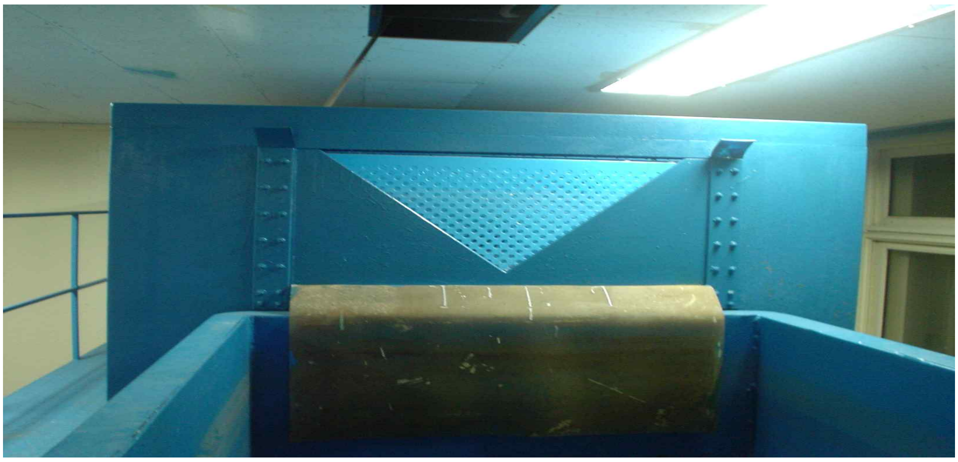
◎ 누마지 직각 삼각웨어 실험공식(**군산대학교 수리실험실 개수로 유량공식**)

$$Q = Ch^{\frac{5}{2}} (m^3/\sec)$$

$$C = 1.354 + \frac{0.004}{h} + (0.14 + \frac{0.2}{\sqrt{h_d}})(\frac{h}{B} - 0.09)^2$$

적용범위: $B = 0.50 \sim 1.20m \quad H_d = 0.10 \sim 0.75$

$H = 0.07 \sim 0.26$로 $\frac{B}{3}$이내로 한다.



삼각웨어 사양 : $\theta=90^0,\ B=70cm,\ h_d=35cm$

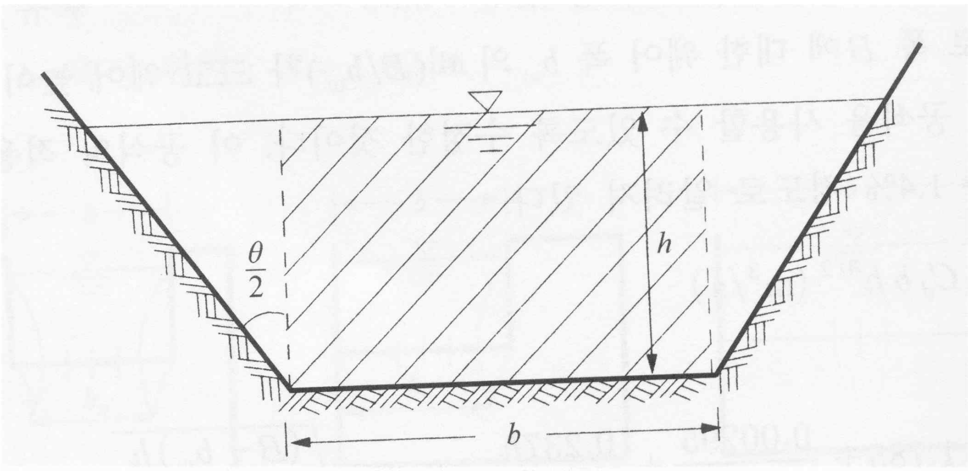
예제 6.11 군산대학 수리 실험실 개수로의 삼각웨어 월류수심이 20cm이면 유량은 얼마인가?

(풀이) $Q=Ch^{\frac{5}{2}}(m^3/\sec)$

$$C=1.354+\frac{0.004}{h}+(0.14+\frac{0.2}{\sqrt{h_d}})(\frac{h}{B}-0.09)^2$$
$$=1.354+\frac{0.004}{0.20}+(0.14+\frac{0.20}{\sqrt{0.35}})(\frac{0.20}{0.70}-0.09)^2$$
$$=1.3923$$

$$Q=1.3923\times0.2^{\frac{5}{2}}=0.0249m^3/\sec=24.9l/\sec$$

[3] 사다리꼴 웨어(trapezoidal weir)



$$Q = C_1 \frac{2}{3} b \sqrt{2g}\, h^{\frac{3}{2}} + C_2 \frac{8}{15} tan \frac{\theta}{2} \sqrt{2g}\, h^{\frac{5}{2}}$$

＊Cipoletti weir(치폴릿 웨어)

예연에 의한 양단 수축이 있고 $\tan \frac{\theta}{2} = \frac{1}{4}$, $(\theta \fallingdotseq 14^\circ)$ 인 사다리꼴 웨어

유량계산시 편리

$$Q = Cbh^{\frac{3}{2}}$$

[4] 웨어의 수위변화에 따른 유량변화와의 관계

① 직사각형 웨어

$$Q = \frac{2}{3} Cb \sqrt{2g}\, h^{\frac{3}{2}}$$

$$= Kh^{\frac{3}{2}}$$

이것을 미분하면

$$dQ = \frac{3}{2} Kh^{\frac{1}{2}} dh$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{\frac{3}{2} Kh^{\frac{1}{2}}}{Kh^{\frac{3}{2}}} dh \ = 1.5 \frac{dh}{h}$$

＊수두 측정시 $x\%$의 오차가 생기면 유량에는 $1.5x\%$의 오차가 발생한다.

② 삼각웨어

$$Q = \frac{8}{15} C \tan\frac{\theta}{2} \sqrt{2g}\, h^{\frac{5}{2}}$$

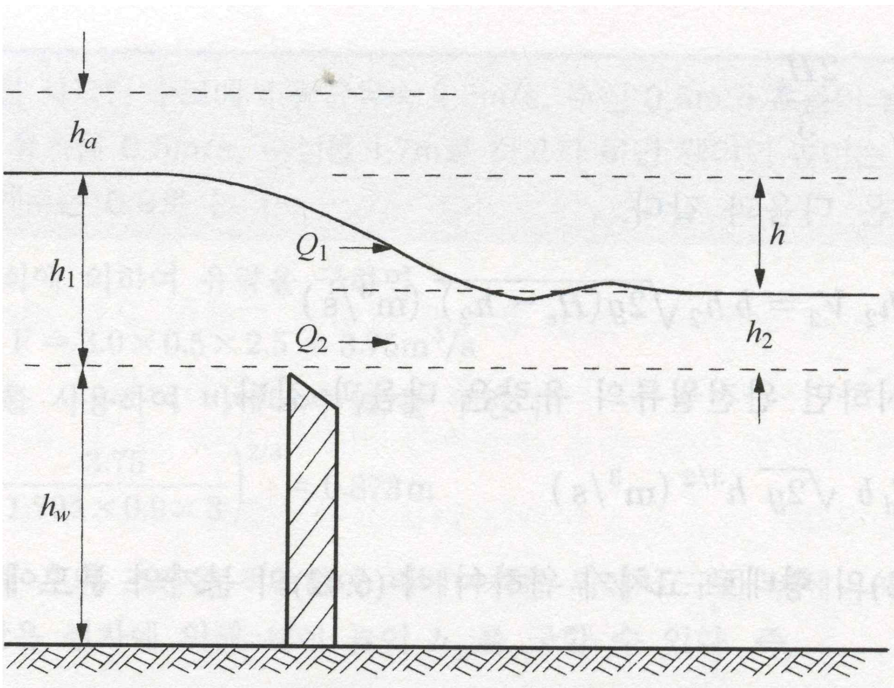
$$= Kh^{\frac{5}{2}}$$

$$dQ = \frac{5}{2} Kh^{\frac{3}{2}} dh$$

$$\frac{dQ}{Q} = \frac{\frac{5}{2} Kh^{\frac{3}{2}} dh}{Kh^{\frac{5}{2}}} = 2.5 \frac{dh}{h}$$

* 수두 측정시 x%의 오차가 생기면 유량에는 2.5x%의 오차가 발생한다.

[5] 예연수중웨어



$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$= \frac{2}{3} C_1 b \sqrt{2g} \left[(h_1 + h_a)^{\frac{3}{2}} - h_a^{\frac{3}{2}} \right] + C_2 b h_2 \sqrt{2g(h + h_a)}$$

여기서 $C_1 = C_2 ≒ 0.63$ 사용

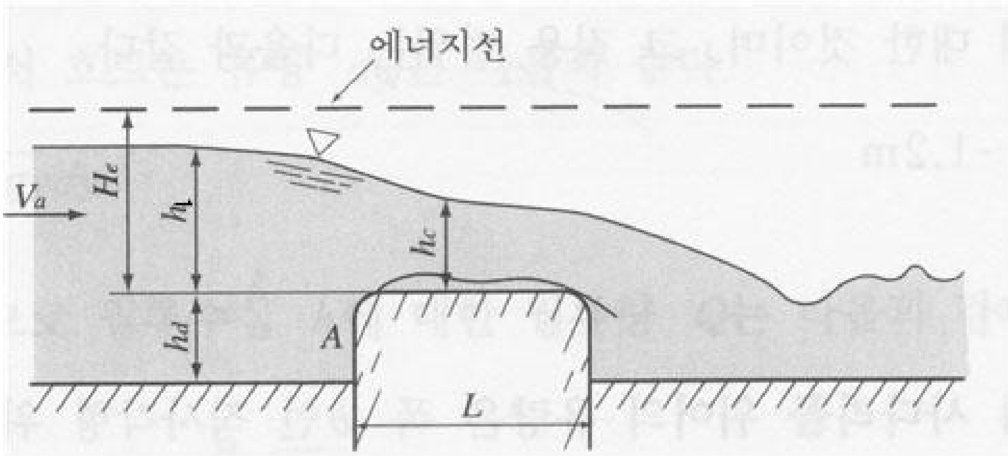
[6] 광정웨어(broad crested weir)

웨어 꼭대기 정부(頂部)의 폭(L)이 웨어정부(頂部)의 수심 h의 70% 이상인 웨어

즉 $L > 0.7h$

＊웨어 꼭대기의 흐름이 일반수로의 흐름과 같게 된다.

① 하류의 수위가 웨어의 높이보다 낮을 때



. 웨어 꼭대기의 흐름이 사류(射流)가 생겨 유량이 커진다. 그리고 웨어 꼭대기의 유속은 Bernoulli 정리에 의하여

$$H_e = h_1 + h_a = h + \frac{v^2}{2g}$$

$$v = \sqrt{2g(h_1 + ha - h)}$$

$$= \sqrt{2g(H_e - h)}$$

$$Q = bh\sqrt{2g(H_e - h)} \quad \text{--- ①}$$

수심 h는 최대의 유량을 갖는 수심이며 $\frac{\partial Q}{\partial h} = 0$ 를 만족한다.

Bernoulli의 법칙

$$h = h_c = \frac{2}{3}(h_1 + h_a) = \frac{2}{3}H_e$$

이것을 ①식에 대입하면

$$Q = bh\sqrt{2g(H_e - h)}$$

$$= b(\frac{2}{3}H_e)\sqrt{2g(H_e - \frac{2}{3}H_e)}$$

$$=\frac{2}{3}bH_e\sqrt{\frac{2}{3}gH_e}$$

여기서 $\frac{2}{3}\sqrt{\frac{2}{3}g}=1.7$

$$Q=1.70bH_e^{\frac{3}{2}}$$

실제는 유량은

$Q=1.70CbH_e^{\frac{3}{2}}$ 여기서 $H_e=h_1+\frac{v_a^2}{2g}$

여기서 유량계수 $C=0.98\sim 1.03$, 보통 $C=1.0$

위 식은 다음 식으로 표시하기도 한다.

$$Q=mb\sqrt{2g}\,H_e^{\frac{3}{2}}$$

여기서 m은 **월류계수**라 하고 0.38 $\sim$ 0.5 정도의 값을 가진다.

* $h=\frac{2}{3}H_e$인 이유

$Q=bh\sqrt{2g(H_e-h)}$ 에서

$$\frac{\partial Q}{\partial h}=\frac{\partial}{\partial h}\{\frac{\partial}{\partial h}bh\sqrt{2g(H_e-h)}\}$$

$$=b\sqrt{2g}\frac{\partial}{\partial h}[h^2(H_e-h)]^{\frac{1}{2}}$$

$$=b\sqrt{2g}\frac{\partial}{\partial h}(h^2H_e-h^3)^{\frac{1}{2}}$$

$$=b\sqrt{2g}\frac{1}{2}(h^2H_e-h^3)^{-\frac{1}{2}}(2hH_e-3h^2)$$

$$=\frac{b\sqrt{2g}(2hH_e-3h^2)}{(h^2H_e-h^3)^{\frac{1}{2}}}$$

$$=0$$

$$\therefore\ 2b\sqrt{2g}(2hH_e-3h^2)=0$$

$$\therefore\ 2hH_e-3h^2=0$$

$$\therefore\ h=\frac{2}{3}H_e$$

예제 6.12 광정웨어의 수로 폭이 2.5m, 웨어 높이 0.4m, 상류 수심이 0.9m일 때 유량을 구하라. 단 C=1.0이다.

(풀이) 접근 유속을 무시($v_a = 0$)하고 유량을 구하면

$$Q = 1.70CBH_e^{\frac{3}{2}} = 1.70 \times 1.0 \times 2.5 \times 0.9^{\frac{3}{2}} = 3.63m^3/\sec$$

$$v_a = \frac{Q}{A} = \frac{Q}{B(h_1 + h_d)} = \frac{3.63}{2.5(0.9+0.4)} = 1.12m/\sec$$

$$H_e = H_1 + \frac{V_a^2}{2g} = 0.9 + \frac{1.12^2}{2 \times 9.8} = 0.964m$$

$$Q = 1.70CBH_e^{\frac{3}{2}} = 1.70 \times 1.0 \times 2.5 \times 0.964^{\frac{3}{2}} = 4.02m^3/\sec$$

예제 6.13 폭 6.0m, 수심 0.8m의 콘크리트 직사각형 단면 수로가 1:1000의 경사로 설치되어 있다. 지금 수로 상에서 1.0m 높이의 광정웨어를 설치하면 상류(上流)측 수심은 얼마나 되겠는가? 단 수로의 조도계수는 0.015이고, 광정웨어 월류계수는 0.4로 한다.

(풀이)

1) 먼저 수로의 등류유량을 Manning식으로 구한다.

수로 단면적 $A = bh = 6.0 \times 0.8 = 4.8m^2$

수리수심 $R = \frac{A}{P} = \frac{4.8}{(6+2\times 0.8)} = 0.632m$

수로의 유량 $Q=\frac{1}{n}AR^{\frac{2}{3}}I^{\frac{1}{2}}$

$$=\frac{1}{0.015}\times 4.8\times 0.632^{\frac{2}{3}}\times (\frac{1}{1000})^{\frac{1}{2}}=7.45m^3/\mathrm{sec}$$

2) 광정웨어 유량공식으로부터 상류측 수심을 구한다.

$H_e=h_1+h_a,\quad h_a=\frac{v_a^2}{2g}$ 를 참고하여

$$Q=mb\sqrt{2g}\,H_e^{\frac{3}{2}}=mb\sqrt{2g}\,(h_1+h_a)^{\frac{3}{2}}$$

$$7.45=0.4\times 6.0\times \sqrt{2\times 9.8}\,(h_1+h_a)^{\frac{3}{2}}$$

$$\therefore h_1+h_a=0.586,\quad h_1=0.586-ha$$

그런데 $h_a=\frac{v_a^2}{2g}=\frac{1}{2g}[\frac{Q}{b(h_d+h_1)}]^2=\frac{1}{2\times 9.8}[\frac{7.45}{6(1.0+h_1)}]^2$

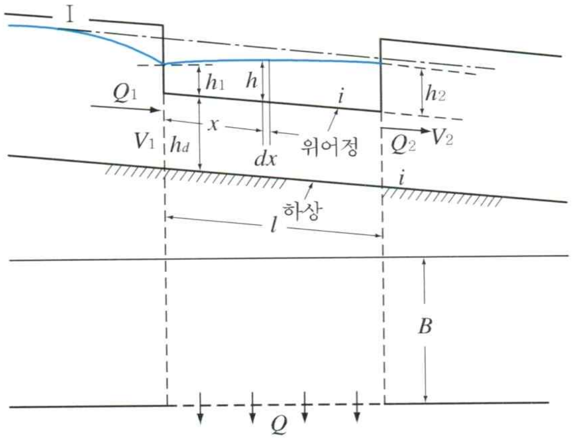
$$=\frac{0.0786}{(1.0+h_1)^2}$$

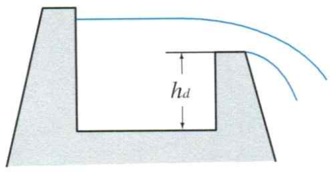
$$h_1=0.586-\frac{0.0786}{(1.0+h_1)^2}$$

시산법으로 $h_1=0.553m$

웨어 상류측 수심 $h_1+h_d=0.553+1.0=1.553m$

[7] 횡 웨어





웨어 상류단에서 하류단까지에 x만큼 떨어진 점의 월류수심 h는

$$h = h_1 + \frac{h_2 - h_1}{l} \bullet x$$

dx부분에 월류하는 유량 dQ는

$$dQ = \frac{2}{3} C \sqrt{2g} \left(h_1 + \frac{h_2 - h_1}{l} x\right)^{\frac{3}{2}} dx$$

$$Q = \int_0^l dQ dx = \int_0^l \frac{2}{3} C \sqrt{2g} \left(h_1 + \frac{h_2 - h_1}{l} x\right)^{\frac{3}{2}} dx$$

$$\therefore Q = \frac{4}{15} C \sqrt{2g} \frac{h_2^{5/2} - h_1^{5/2}}{h_2 - h_1} l$$

여기서 $h_1 = h_2 - \dfrac{(V_1^2 - V_2^2)}{2g}$

예제 6.14 직사각형 단면수로의 도중에 횡웨어를 설치하여 유량 $25m^3/\sec$중 $12m^3/\sec$를

방류하려면 횡웨어 길이는 얼마로하면 좋은가? 단, 웨어마루는 하상경사와 평형하다고 한다. 단 $h_d = 0.9m,\ B = 10m, h_2 = 0.7m, \frac{4}{15}C\sqrt{2g} = 0.75$

(풀이) $Q_2 = Q_1 - Q = 25 - 12 = 13m^3/\sec$

$$V_2 = \frac{Q_2}{B(h_2 + h_d)} = \frac{13}{10(0.7 + 0.9)} = 0.815m/\sec$$

$$h_1 = h_2 - \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} = 0.7 - \frac{V_1^2 - 0.815^2}{2 \times 9.8}$$

$$Q_1 = (h_1 + h_d)BV_1$$

$$V_1 = \frac{Q_1}{(h_1 + h_d)B}$$

$$h_1 = 0.7 - [(\frac{25}{10(h_1 + 0.9)})^2 - 0.815^2]/(2 \times 9.8)$$

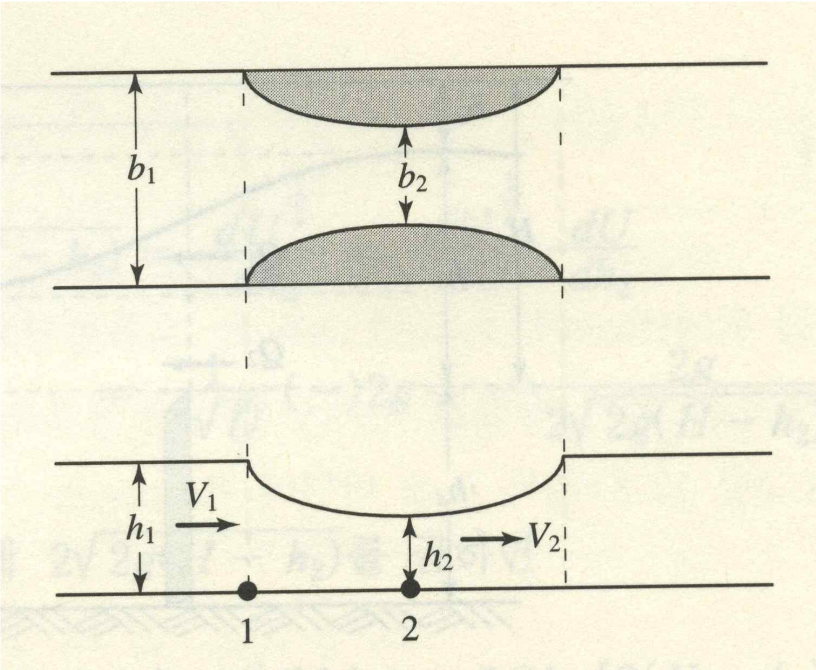
시산법으로 $h_1 = 0.59m$

$$Q = \frac{4}{15}C\sqrt{2g}\,\frac{h_2^{5/2} - h_1^{5/2}}{h_2 - h_1}l$$

$$12 = 0.75 \times \frac{0.7^{5/2} - 0.59^{5/2}}{0.7 - 0.59} \bullet l$$

$$l = \frac{12}{0.75 \times 1.3} = 12.31m$$

6.5 벤츄리 플륨(venturi flume)



$$H_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = H_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g}$$

$\alpha = 1.0$이고, $V_1 = \dfrac{Q}{B_1 H_1}$, $V_2 = \dfrac{Q}{B_2 H_2}$이므로

$$H_1 + \frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{B_1 H_1}\right)^2 = H_2 + \frac{1}{2g}\left(\frac{Q}{B_2 H_2}\right)^2$$

$$\therefore Q = \sqrt{\frac{2g(H_1 - H_2)}{\left(\frac{1}{B_2 H_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{B_1 H_1}\right)^2}}$$

유량계수를 C라 하면 실제유량은

$$\therefore Q = C\sqrt{\frac{2g(H_1 - H_2)}{\left(\frac{1}{B_2 H_2}\right)^2 - \left(\frac{1}{B_1 H_1}\right)^2}}$$

여기서 $C = 0.96 \sim 1.0$이다.

예제 6.15 수로폭 2m, 수심이 1.8m일때 벤츄리플륨은 폭 1.2m,수심 1.5m로 되었다. C=0.98로 가정하고 유량을 구하라.

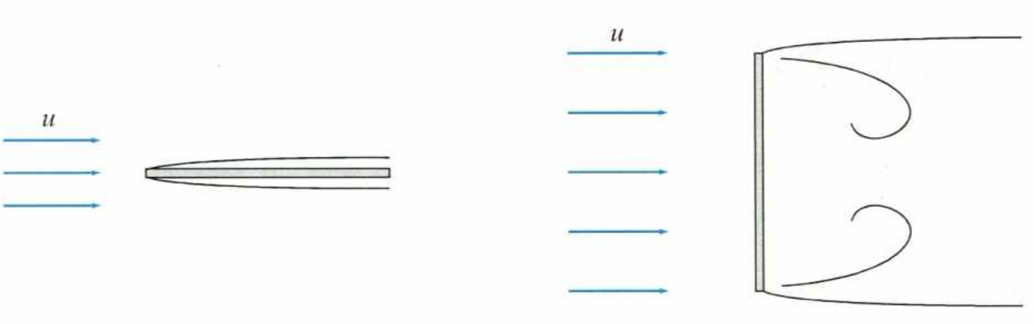
(풀이)

$$Q = C\sqrt{\frac{2g(H_1 - H_2)}{(\frac{1}{B_2H_2})^2 - (\frac{1}{B_1H_1})^2}}$$

$$= 0.98\sqrt{\frac{2\times 9.8(1.8-1.5)}{(\frac{1}{1.2\times 1.5})^2 - (\frac{1}{2\times 1.8})^2}}$$

$$= 4.90 m^3/\sec$$

제7장 항력



(a) 마찰항력 (friction drag) (b) 압력항력 (pressure drag)

7.1 유체중에 물체가 받는 힘

유수중의 물체에 작용하는 힘은 두 성분으로 나눌수 있으며 흐름 방으로 작용하느 힘을 항력(drag), 흐름에 직각 방향으로 작용하는 힘을 양력(lift)이라 한다.

항력= 마찰항력+형상항력
(표면저항)+(형상저항)

항력 D는 물체의 흐름방향 투영면적 A와 동압력 $\dfrac{\rho V^2}{2}$ 에 비례하며 다음식과 같다.

$$D = C_D A \frac{\rho V^2}{2}$$

여기서 C_D 는 항력계수로 $C_D = C_f + C_P$, 즉 표면형상계수 C_f 와 형상저항계수 C_P의 합이다.

양력 L은 다음식으로 표시된다.

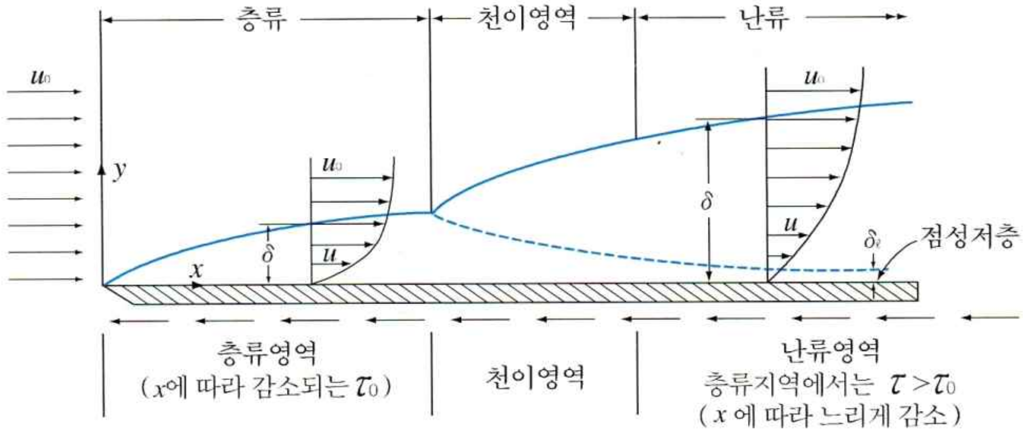
$$L = C_L \frac{\rho V^2}{2} Bl$$

여기서 B는 흐름방향에 직각인 표면의 폭, l 은 흐름방향에 평행한 표면길이이다.

7.2 물체의 저항

1) 마찰항력

평판 표면의 단위 면적당 마찰력 τ_0는 층류 경계층의 경우 Blasiuis에 의하면 다음식과 같다.



$$\tau_0 = 0.332 \mu u_0 \sqrt{\frac{u_0}{\nu x}}$$

흐름 방향 길이 l, 흐름방향에 수직방향의 길이를 b라고 하면, 그 판의 한쪽면에 작용하는 항력 D는 다음과 같다.

$$D = b \int_0^l \tau_0 dx = 0.0664 \mu b u_0 \sqrt{\frac{u_0 l}{\nu}}$$

$$D = C_f bl \frac{\rho u_0^2}{2}$$

$$C_f = 1.328 \sqrt{\frac{1}{R_e}} \quad R_e = \frac{u_0 l}{\nu}$$

여기서 C_f 는 표면마찰계수이다.

난류경계층의 경우에 대해서는 Karman에 의하면 다음과 같다.

$$\tau_0 = 0.0456 (\frac{\nu}{u_0 \delta})^{1/4} \frac{\rho u_0^2}{2}$$

$$\delta = 0.376 (\frac{\nu}{u_0 x})^{1/5} x$$

$$D = 0.376 \rho u_0^2 bl (\frac{\nu}{u_0 l})^{1/5}$$

$$D = C_f bl \frac{\rho u_0^2}{2}$$

$$C_f = \frac{0.072}{R_e^{1/5}}, \ R_e = \frac{u_0 l}{\nu}$$

2) 압력항력

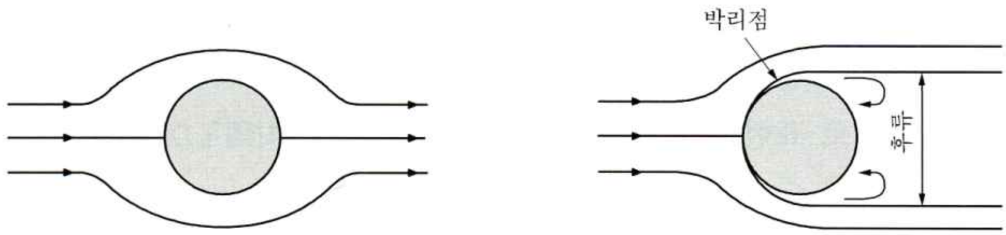
물체의 형상 저항에 의한 압력항력은 일반적으로 다음 식과 같다.

$$D = C_D A \frac{\rho u^2}{2}$$

여기서 u : 유속

A : 흐름방향으로 물체를 투영시킨 면적

C_D : 항력계수



원주의 길이 l , 직경을 d로 한 경우 압력항력 D는 다음 식으로 구한다.

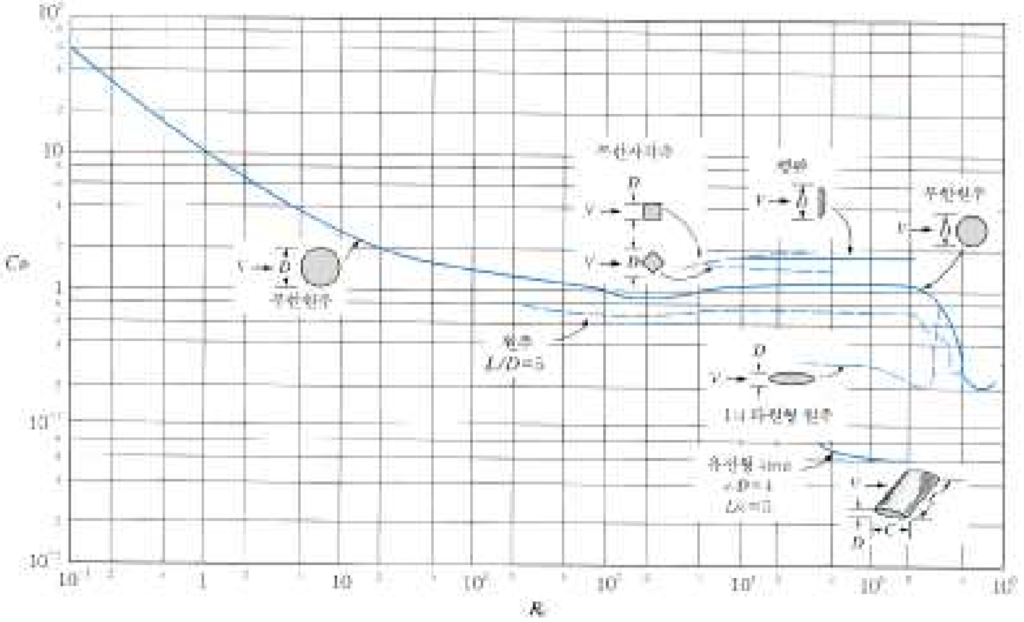
$$D = C_D dl \frac{\rho u^2}{2}$$

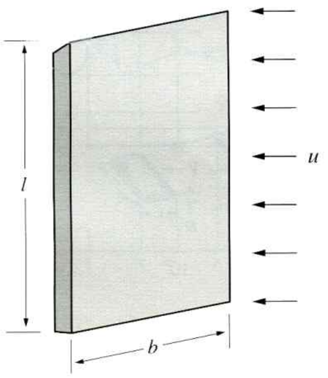
C_D는 $R_e = ud/\nu$와 d/l의 함수가 된다.

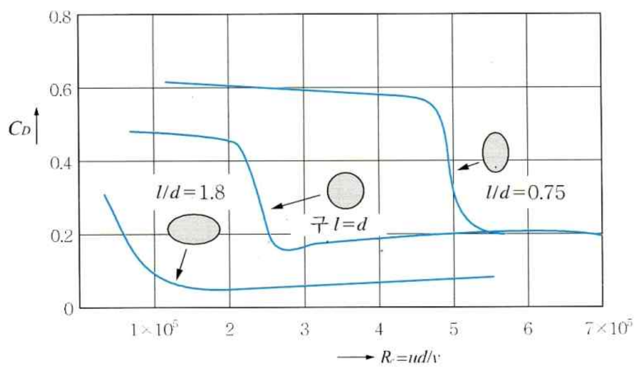
수중 수직한 폭 b, 길이 l의 평판이 받는 압력항력 D는 다음 식으로 구한다.

$$D = C_D bl \frac{\rho u^2}{2}$$

여기서 C_D는 b/l에 따라 변한다.







예제 7.1 직경 0.2m의 말뚝이 유속 2m/sec, 수심 2.5m, 수온 20^0C의 유수 중에 수직으로 놓여 있다. 이 말뚝이 유수로부터 받는 힘을 구하라.

(풀이) 이 말뚝의 레이놀드 수 R_e는

$$R_e = \frac{ud}{\nu} = \frac{200 \times 20}{0.0101} = 3.96 \times 10^5$$

항력계수 C_D는 그림 7-5로부터 0.60이고,

유수로부터 받는 힘 F는

$$F = C_D(dl)\frac{\rho u^2}{2}$$
$$= 0.6 \times (0.2 \times 2.5) \times \frac{102.04 \times 2^2}{2} = 61.23kg$$

예제 7.2 건물옥상에 직경 30cm, 높이가 20m인 파이프로 된 국기 게양대가 설치되어

있다. 풍속이 35m/sec일 때 파이프의 전항력과 파이프하단의 휨모멘트를 계산하라. 단 공기의 점성계수 $\mu = 1.82 \times 10^{-6} kg \cdot \sec/m^2$이고, 밀도 $\rho = 0.123 kg \cdot \sec^2/m^4$이다.

(풀이) $$R_e = \frac{\rho Vd}{\mu} = \frac{0.123 \times 35 \times 0.3}{1.82 \times 10^{-6}} = 7.098 \times 10^5$$

그림7-5에서 $C_D = 0.2$이다.

$$D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = 0.2 \times 0.3 \times 20 \times \frac{0.123 \times 35^2}{2} = 90.405 kg$$

전항력이 파이프의 중에 작용한다고 가정하면

$$M = D \cdot \frac{l}{2} = 90.405 \times \frac{20}{2} = 904.05 kg \cdot m$$

3) 3차원 물체가 받는 항력

$$D = C_D A \frac{\rho V^2}{2}$$

Stokes 법칙 : 아주 작은 레이놀드수, 즉 $\frac{Vd}{\nu} \ll 1$일 때 구의 항력은 다음 식과 같다.

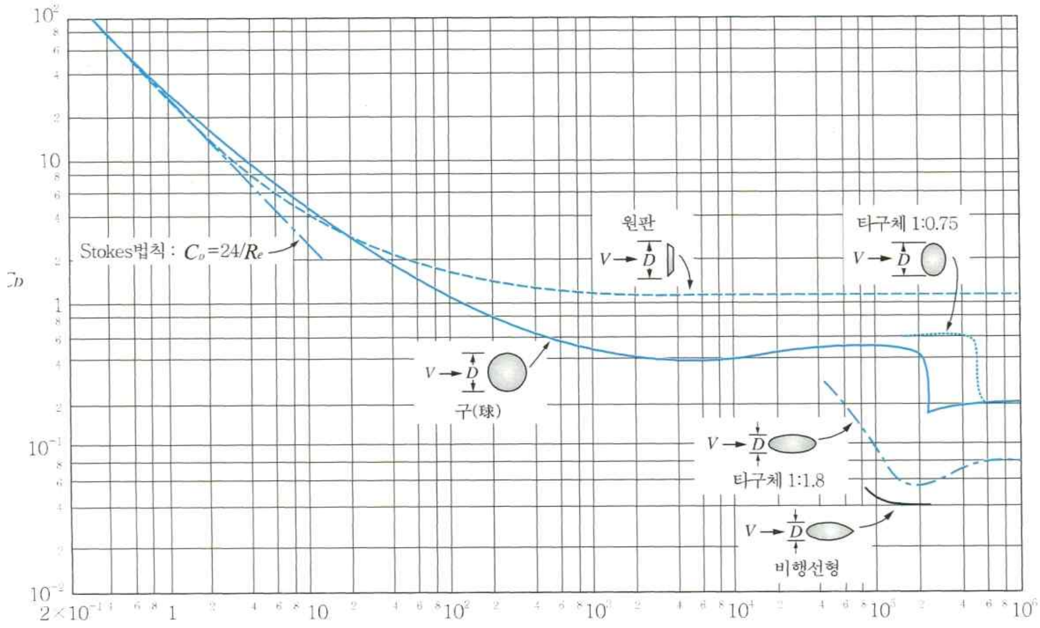
$$D = 3\pi\mu Vd, \quad C_D = \frac{24}{R_e}$$

예제 7.3 기름속에서 직경 10mm이 구가 6cm/sec속도로 이동할 때 이 구에 작용하는 항력을 구하시오. 단 기름의 점성계수 $\mu = 10^{-2} kg \cdot \sec/m^2$, 밀도 $\rho = 86.73 kg \cdot \sec^2/m^4$이다.

(풀이) $$R_e = \frac{\rho Vd}{\mu} = \frac{86.73 \times 0.06 \times 0.01}{10^{-2}} = 5.2$$

그림 7-9로부터 $C_D = 7.2$

$$D = C_D A \frac{\rho V^2}{2} = 7.2 \times \frac{\pi \times 0.01^2}{4} \times \frac{86.73 \times 0.06^2}{2} = 8.82 \times 10^{-5} kg$$



Stokes법칙 : $C_D=24/R_e$
원판
타구체 1:0.75
구(球)
타구체 1:1.8
비행선형
C_D

제8장 유사

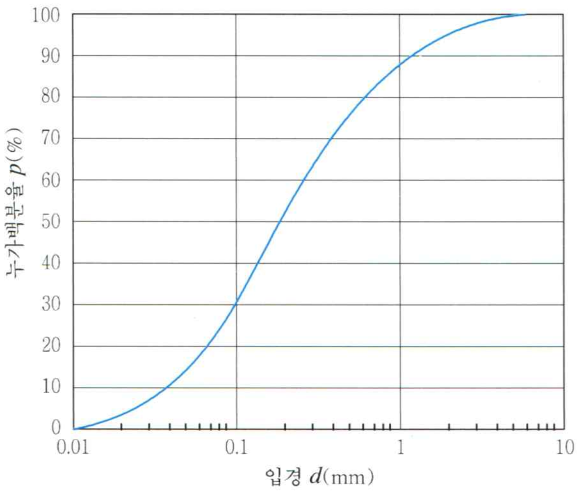
유사=소류사 + 부유사

1) 대표입경

평균입경 $d_m = \sum_{p=0}^{100} d\Delta p / \sum_{p=0}^{100} \Delta p$

기하 평균입경 $D_g = \sqrt{d_{84} \cdot d_{16}}$

중앙 입경 d_{50}



Kramer의 균등비 $M = \sum_{p=0}^{50} d \cdot \Delta p / \sum_{p=50}^{100} d \cdot \Delta p$

Hazen의 균등계수 $U.C = d_{60}/d_{10}$

체분석계수 $S_0 = \sqrt{d_{75}/d_{25}}$

토사의 혼합계수 $\lambda = \sum_{p=0}^{p_{\max}} d \cdot \Delta p / \sum_{p_{\max}}^{100} d \cdot \Delta p$

$\beta = (2+M)/(1+2M)$

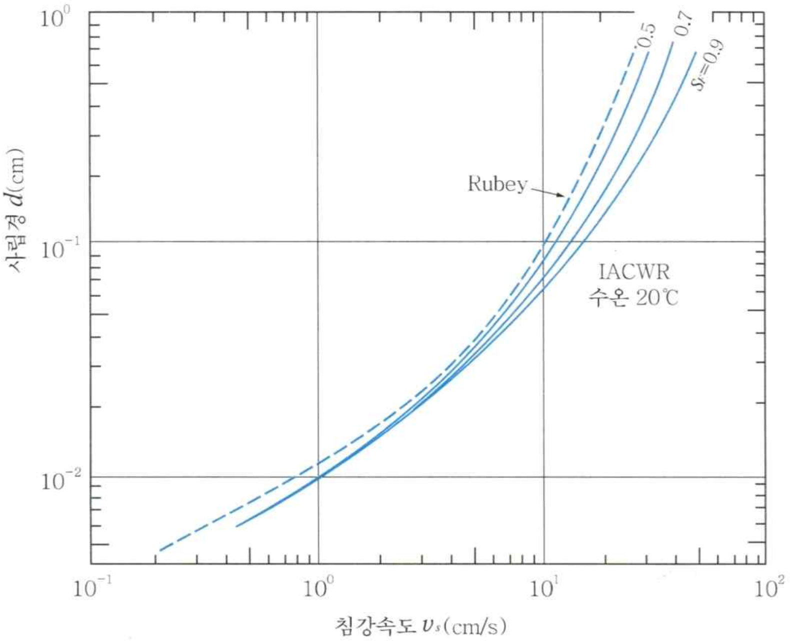
2) 침강속도

토사의 침강속도 $v_s = \left(\frac{4}{3C_D} sgd\right)^{\frac{1}{2}},\ s = \frac{\rho_s}{\rho} - 1$

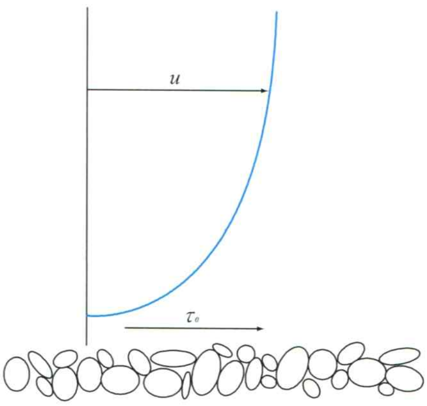
$R_e < 1\ :\ C_D = 24/R_e,\ v_s = sgd^2/18\nu$ ($Stokes$의 식)

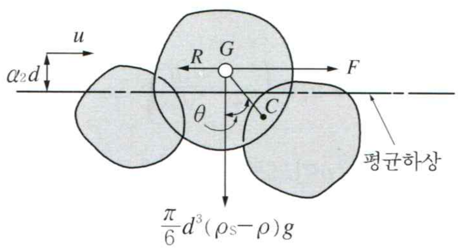
$R_e = 1 \sim 100\ :\ C_D = 12.65/R_e 0.5,\ v_s = 0.223(s^2 g^2/\nu)^{1/3} d$ ($Allen$의 식)

$R_e = 10^3 \sim 2.5 \times 10^5\ :\ C_D = 0.4,\ v_s = 1.826(sgd)^2$ ($Newton$의 식)



3) 한계소류력





균일입경에 대한 Shields 한계소류력 공식은

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s-\rho)gd}=\frac{u_{*c}^2}{\frac{1}{\rho}(\rho_s-\rho)gd}=\Psi(\frac{u_{*c}d}{\nu})$$

이와가키 실험식: $u_{*c}=\sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}}, \quad \tau_c=\rho u_{*c}^2$

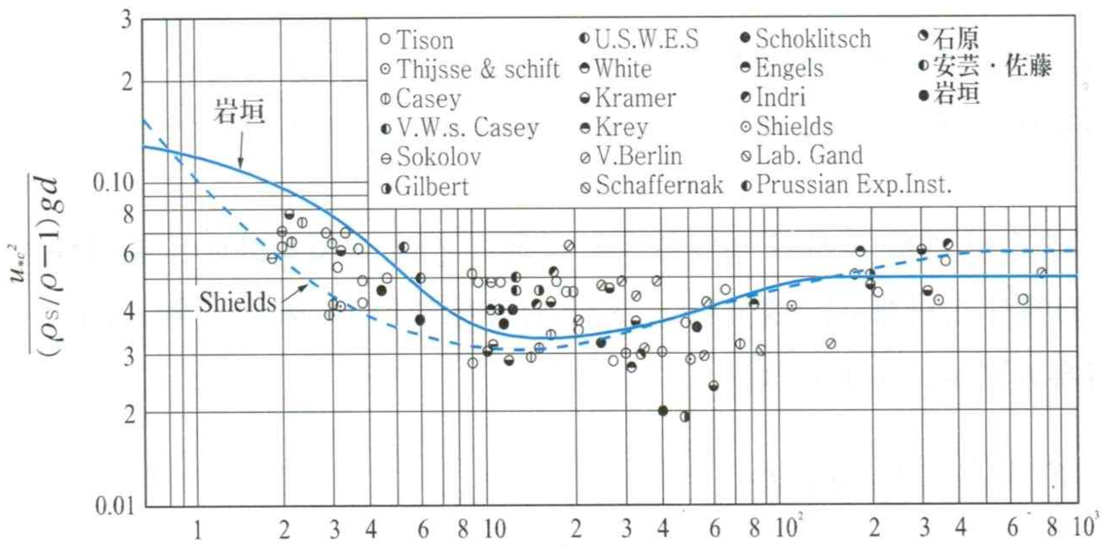
$$d \geq 0.303cm : u_{*c}^2=80.9d$$

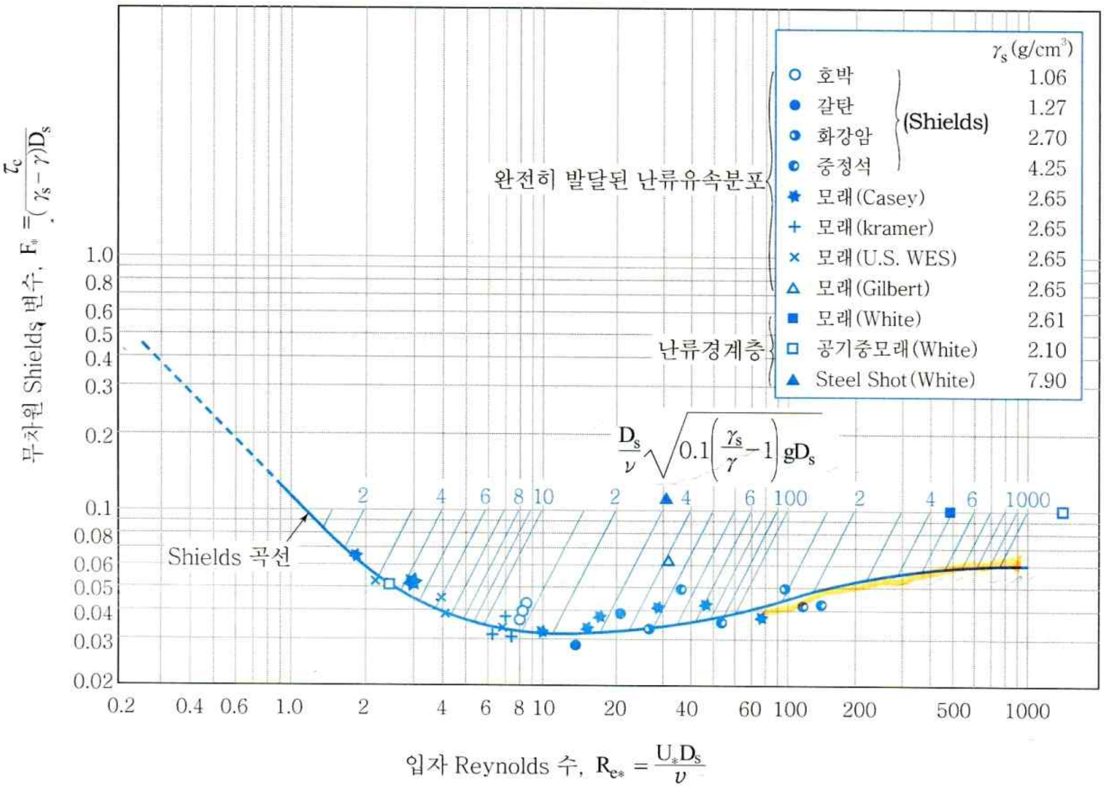
$$0.118 \leq d \leq 0.303 : \quad =134.6d^{31/22}$$

$$0.0565 \leq d \leq 0.118 : \quad =55.0d$$

$$0.0065 \leq d \leq 0.0565 : \quad =8.41d^{11/32}$$

$$d \leq 0.0065 : \quad =226d$$





예제 8.1 경사가 1/200인 평탄한 하상을 갖는 광폭 장방향 수로의 흐름이 수심 1m의 등류 상태로 흐르고 있다. 하상의 모래가 움직이지 않으려면 모래 입경은 어느 정도 이상이 되어야 하는가? 모래비중은 2.65, 동점성계수는 $0.01cm^2/\sec$이다.

(풀이) $u_* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ $\tau = wRI = \rho gRI \simeq \rho ghI$

$R_{e*} = \frac{u_* d}{\nu} > 200$라고 가정하면

$$\frac{\tau_c}{(\rho_s - \rho)gd} = 0.05 \quad \tau_c = 0.05(\rho_s - \rho)gd$$

$\tau < \tau_c$: 모래가 움직이지 않을조건식

$$\rho ghI < 0.05(\rho_s - \rho)gd$$

$$hI < 0.05(\frac{\rho_s}{\rho} - 1)d$$

$$100 \times \frac{1}{200} < 0.05(2.65 - 1)d$$

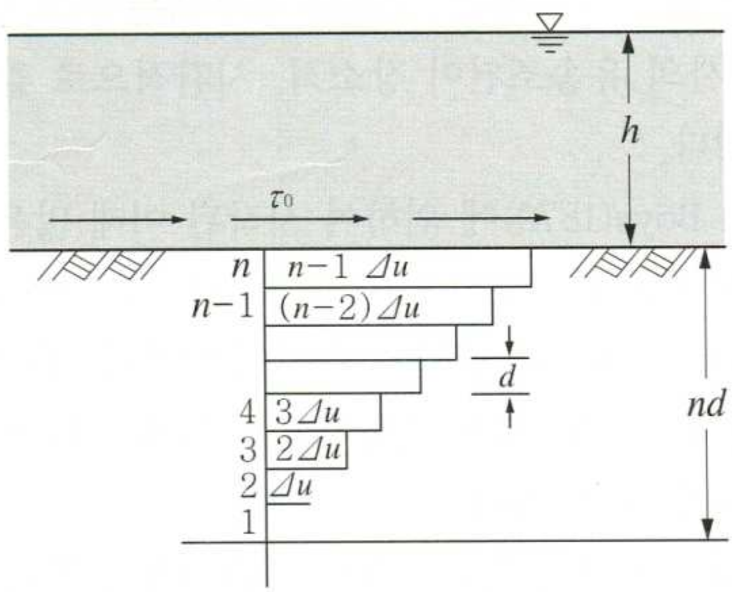
$$d > 6.06cm$$

검토 : $u_* = \sqrt{ghI} = \sqrt{980 \times 100 \times 1/200} = 22.1cm/\sec$

$$\frac{u_* d}{\nu} = \frac{22.1 \times 6.06}{0.01} = 13392.6 > 200 \quad \therefore O.K$$

8.1 소류사량공식

1) Du Boys 식(1879)



$$q_B = \rho sgnd(n-1)\frac{\Delta u}{2}$$

Du Boys는 하상의 저항력과 한계소류력이 같다고 가정하여 저면의 마찰력 τ_0를 구했다. 토사층의 마찰계수를 C_f라 하면

$$\tau_0 = whI = C_f(\rho_s - \rho)gnd$$

이고, 한계소류력은 상층이 움직이기 시작할 때의 저항력이므로 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_c = C_f(\rho_s - \rho)gd$$

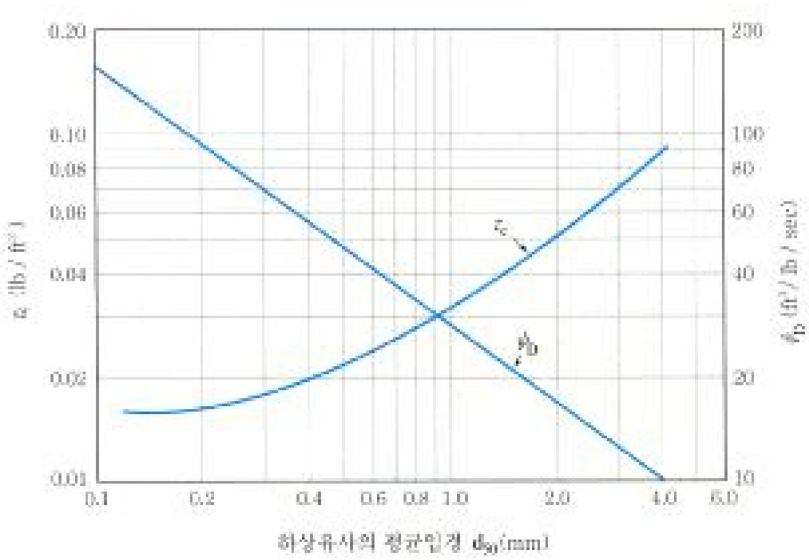
이들 식으로부터

$$\tau_0 = n\tau_c\,, \quad n = \frac{\tau_0}{\tau_c}$$

n은 결국 이동층 저면의 마찰력과 이동층 최상층의 한계 소류력과의 비라는 것을 알 수 있다. 따라서 Du Boys의 소류사량 공식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$q_B = \frac{\rho_s g \triangle ud}{2\tau_c^2}\tau_0(\tau_0 - \tau_c) = \Phi_D\tau_0(\tau_0 - \tau_c) \quad (Ib/ft/\sec)$$

Φ_D와 τ_c는 유사의 평균 입경과 관련된 상수로서 Straub의 다음 그림에서 구할 수 있다.



그리고 Φ_D에 관한 몇가지 실험 공식을 소개하면 다음과 같다.

Schoklitsch공식(1914);

$$q_B = 0.54\frac{\rho_s}{\rho_s - \rho}\tau_0(\tau_0 - \tau_c)\ kg/\sec/m$$

Chang공식(1937) ;

$$q_B = kn_M\tau_0(\tau_0 - \tau_c)$$

여기서 n_M은 Manning의 조도 계수, k는 다음과 같다.

$$\rho_s = 2.65g/cm^3, d_m = 0.23mm : k = 10 \times 10^4$$
$$\rho_s = 2.02g/cm^3, d_m = 0.32mm : k = 21 \times 10^4$$

예제 8.2 어떤 하천에서 수심이 10ft, D_{50}이 0.4mm, 하상경사가 0.000217일 때 단위 폭당 소류사량을 계산하라.

(풀이)

입자의 입경 0.4mm로부터 그림(8-2)를 이용하여 Φ_D와 τ_c를 구하면

$$\Phi_D = 57ft^3/Ib \cdot \sec,\ \tau_c = 0.02Ib/ft^2$$

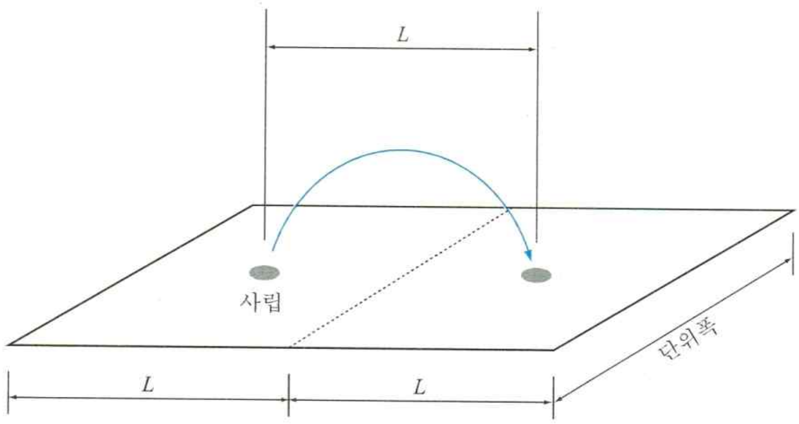
하상 전단력 τ_0는

$$\tau_0 = whI = 62.4 \times 10 \times 0.000217 = 0.1354Ib/ft^2$$

따라서

$$q_B = 57 \times 0.1354 \times (0.1354 - 0.02) = 0.8907Ib/ft \cdot \sec$$

2) Einstein의 소류사량공식(1937)



하상의 사립의 단위시간 및 단위면적당에 대하여 이동확률 p_0는 정규분포를 따른다고 가정하여 다음과 같이 유도하였다.

$$p_0 = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{1}{7}\Psi_*^{-2}}^{\frac{1}{7}\Psi_*^{-2}} e^{-t^2} dt \qquad (8-8)$$

여기서 Ψ_*는 흐름의 수리학적 특성을 나타내는 무차원량으로 **흐름의 강도**(flow intensity)라 하며, 다음식과 같다.

$$\Psi_{*i} = \xi_* Y \left[\frac{\log_{10}(10.6)}{\log_{10}\left(\frac{10.6xX}{d_{65}}\right)} \right]^2 \frac{(\rho_s/\rho - 1)gd_i}{u_*^2} \qquad (8-9)$$

여기서, d_i는 임의의 하상토사 구간에 대한 대표 입경이며, u_*는 소류력에 대한 마찰속도

로서 다음식으로 구한다.

$$u_* = \sqrt{gR' I_e} \qquad (8-10)$$

여기서, I_e는 에너지경사이며, R'는 하상토사의 마찰력과 관련되는 하상경심로 다음식으로부터 **시산법**으로 구한다.

$$\frac{V}{\sqrt{gR' I_e}} = 5.75\log_{10}(\frac{12.27R'x}{d_{65}}) \qquad (8-11)$$

또 차폐계수 ξ_*는 그림(8-15a)에서 d/X의 함수로 표시되고, 양력보정계수 Y는 그림(8-15b)에서 d_{65}/δ 의 함수로 표시되며, 보정계수 x는 그림(8-16)에서 구할 수 있고, δ는 바닥에서 층류저층의 두께로서 다음식으로 구한다.

$$\delta = 11.6\frac{\nu}{u_*} \qquad (8-12)$$

또한, X값은 다음과 같다.

$$\frac{d_{65}}{x\delta} \geq 1.80 : X = 0.77\frac{d_{65}}{x}$$
$$\frac{d_{65}}{x\delta} < 1.80 : X = 1.39\delta \qquad (8-12)$$

입경이 균일할 때, $x = 1$의 경우는 $\xi = Y = 1$로 본다.

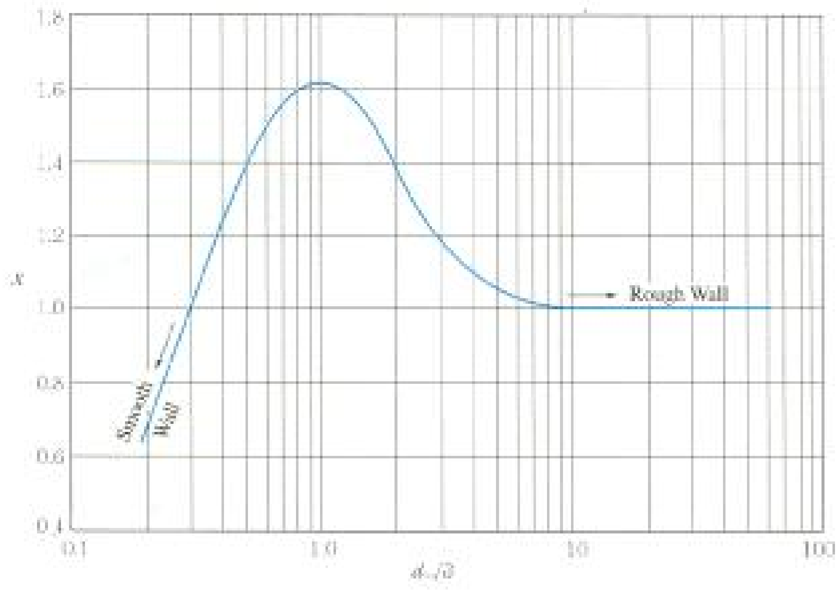


그림 8-16 보정계수

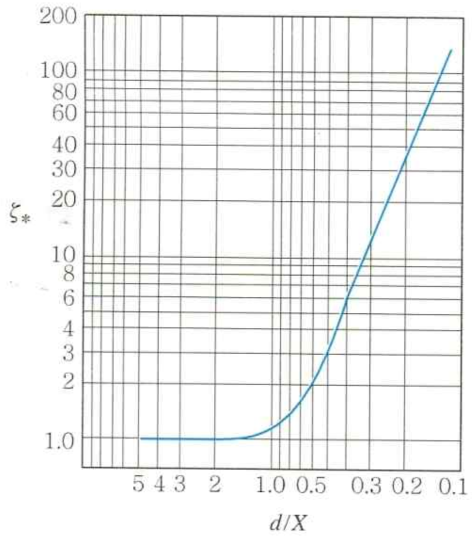


그림 8-15(a)

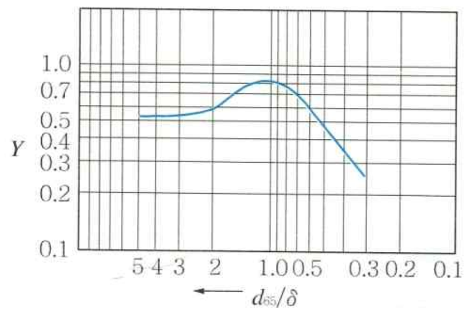


그림 8-15(b)

Einstein은 식(8-8)로 표시되는 토사의 이동확률을 소류사강도 Φ_{B^*}의 함수로서 다음과 같이 표시하였다. 이식을 Einstein의 **소류사 함수식**이라 한다.

$$p_0 = 1 - \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-\frac{1}{7}\Psi_*^{-2}}^{\frac{1}{7}\Psi_*^{-2}} e^{-t^2} dt = \frac{43.5\Phi_{B^*}}{1+43.5\Phi_{B^*}} \quad (8-13)$$

여기서 Φ_{B^*}는 다음식과 같다.

$$\Phi_{B^*i} = \frac{q_{Bi}}{p_i} / [(\frac{\rho_s}{\rho} - 1) g d_i^3]^{1/2} \quad (8-14)$$

여기서, p_i는 하상 구성 재료중 평균입경 d_i인 입자의 중량 구성비이다. Einstein의 소류사 함수식을 풀어서 q_B를 구한다는 것은 많은 시간이 소요되므로 그림(8-17)을 이용하여 ψ_*값으로부터 Φ_{B^*}를 구하여 이것을 식(8-14)에 대입하여 q_B를 구한다.

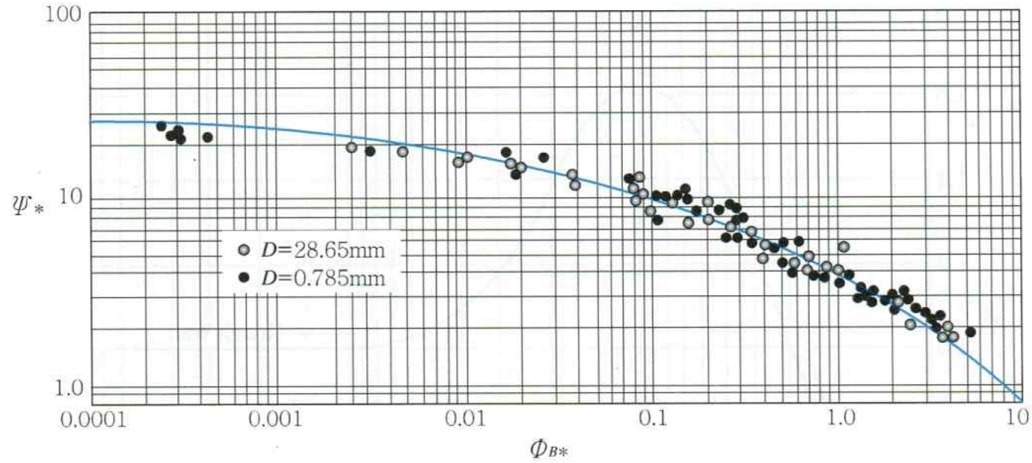


그림 8-17

Einstein의 **소류사량 계산 단계**를 요약하면 다음과 같다.

① x값을 가정($x=1$), 식(8-11)에서 R'을 시산법으로 구한후

② 식(8-10)에서 u_*를 계산

③ 식(8-9)에서 각 입경구간에 대한 ψ_{*_i} 계산

④ 그림(8-17)에서 Φ_{B*_i}값 결정

⑤ 식(8-14)에서 q_{Bi}계산

⑥ 모든 입자직경구간 l에 대해 ③~⑤의 절차로 단위폭당 소류사를 계산하여 합산을 통해 $\sum q_{Bi}$을 얻고 하폭을 곱하면 전유사량 Q_B를 구할 수 있다.

예제 8.3

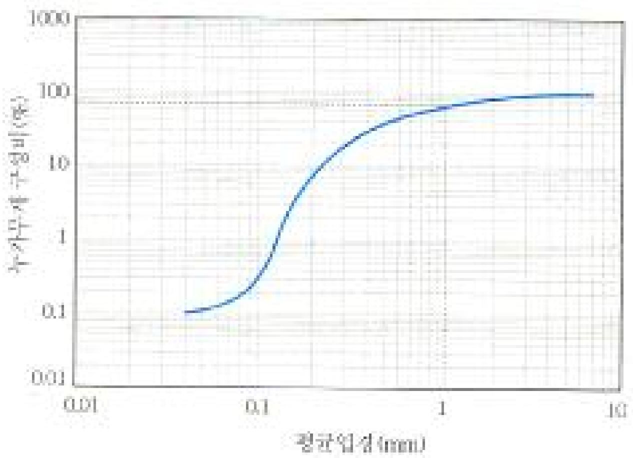
평균수심이 1.61m, 하폭 33m, 경사가 1/1330 하천수로에 96$m^3/\sec$의 물이 흐르고 있다. 하상재료 입도 분포표가 아래와 같을 때 Einstein의 소류사량 공식을 이용하여 소류사량을 구하라. 하상토의 비중은 2.678, 동점성계수 $\nu = 1.01 \times 10^{-6} m^2/\sec$로 가정한다.

구간번호	입경(mm)	평균입경(mm)	무게구성비(%)	누가무게구성비(%)
1	20~15	17.32	0.5	100
2	15~10	12.25	4.6	99.5
3	10~5	7.07	10.1	94.9
4	5~1.9	3.07	16.9	84.8
5	1.9~0.864	1.28	15.6	67.9
6	0.864~0.495	0.65	28.3	52.3
7	0.495~0.221	0.31	19.6	24.0
8	0.221~0.107	0.154	4.2	4.4
9	0.107~0.074	0.089	0.1	0.2
10	0.074~0	0.037	0.1	0.1

(풀이) 평균유속 V는

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{96}{33 \times 1.61} = 1.806 m/\sec$$

체통과률 65%에 해당하는 입경 d_{65}는 아래 누가입도분포곡선으로부터 1.18mm=0.00118m



① $x = 1$ 가정

② 식(8-11)로 R' 결정 ;

$$\frac{1.806}{\sqrt{9.8 \times R_b' \times 7.519 \times 10^{-4}}} = 5.75 \log_{10}(12.27 \frac{R_b' \times 1.0}{0.00118})$$

시산법으로 R_b'를 구하면 $R_b' = 0.856m$

③ 식(8-12)로 δ를 계산하여 ①에서 가정한 $x = 1$ 검토;

$$u_* = \sqrt{g R_b' I_e} = \sqrt{9.8 \times 0.856 \times 7.519 \times 10^{-4}} = 0.0794m$$

따라서

$$\delta = 11.6 \frac{\nu}{u_*} = 11.6 \times \frac{1.01 \times 10^{-6}}{0.0794} = 1.476 \times 10^{-4}$$

그러므로

$$\frac{d_{65}}{\delta} = \frac{0.00118}{1.476 \times 10^{-4}} = 8$$

그림(8-24)에서 $d_{65}/\delta = 8$일 때 $x = 1$이므로 : O.K.! 따라서 $x = 1$, $R_b' = 0.856m$

④ 식(8-12)로 X 계산 ;

$$\frac{d_{65}}{x\delta}=\frac{0.00118}{1.0\times 1.479\times 10^{-4}}=8 > 1.8$$

따라서

$$X=0.77\frac{d_{65}}{x}=0.77\times\frac{0.00118}{1.0}=9.086\times 10^{-4}m$$

⑤ 그림(8-21)에서 Y값 취득 ; $\dfrac{d_{65}}{\delta}=8$에 대한 Y값을 읽으면 $Y=0.52$

⑥ 각 구간에 대한 평균 입경에 d_i를 이용하여 이후 ⑦에서 ⑩까지 각 구간별로 반복 계산한다.

⑦ 그림(8-3)에서 ξ_* 취득 ; i=1구간 입경의 경우

$$\frac{d_1}{X}=\frac{0.01732m}{9.086\times 10^{-4}m}=19.06$$

따라서, $\xi_{*1}=1.0$

⑧ 식(8-9)에서 Ψ_{*1}계산 ; 1구간 입경의 경우

$$\begin{aligned}\Psi_{*1}&=\xi_{*1}Y[\frac{\log_{10}(10.6)}{\log_{10}(\dfrac{10.6xX}{d_{65}})}]^2\frac{(\rho_s/\rho-1)gd_1}{u_*^2}\\&=1.0\times 0.52[\frac{\log_{10}(10.6)}{\log_{10}(10.6\times\dfrac{1\times 9.086\times 10^{-4}}{0.00118})}]^2\times(\frac{2.678-1.0}{1.0}\times\frac{9.8\times 0.01732}{0.0794^2})\\&=29.69\end{aligned}$$

⑨ 그림(8-23)에서 Φ_{*1} 취득 ; 1구간 입경의 경우

$\Phi_{*1}=0.0001$

⑩ 식(8-14)에서 단위폭당 소류사량 q_B 계산 ; 1구간 입경의 경우

$$\Phi_{B*1}=\frac{q_{B1}}{p_1}/[(\frac{\rho_s}{\rho}-1)gd_1^3]^{1/2}$$

$$0.0001=\frac{q_{B1}}{0.005}/[(\frac{2.678}{1.0}-1)\times 9.8\times 0.01732^3]^{1/2}$$

$$q_{B1}=1.238\times 10^{-5}kg/\sec/m$$

⑪ 총 소류사량 Q_B 계산 ; 동일한 방법으로 ⑺ ~ ⑽까지 반복계산하여 전 입자구간에 대해 계산표를 작성하고 $\sum q_{Bi}$을 계산하고 수로폭을 곱하여 구함

$$Q_B = \sum q_{bi} \times B = 684.586 \times 10^{-3} \times 33 = 22.591\, kg/\sec$$

구간 번호	D $(10^{-3}m)$	i_{bw}	R_b (m)	$\frac{D}{X}$	ξ	Ψ_*	Φ_*	$i_{Bw} q_{bw}$ $(10^{-3}kg/sec/m)$
1	1.732	0.5	0.856	19.6	1.0	29.69	0.0001	0.01238
2	1.225	4.6	0.856	13.48	1.0	21.00	0.0026	1.76098
3	0.707	10.1	0.856	7.78	1.0	12.12	0.08	52.1627
4	0.307	16.9	0.856	3.39	1.0	5.28	0.6	187.312
5	0.128	15.6	0.856	14.09	1.0	2.22	3.0	232.745
6	0.065	28.3	0.856	0.715	1.6	1.76	4.0	203.721
7	0.031	19.6	0.856	0.341	10	5.31	0.59	6.85441
8	0.0154	4.2	0.856	0.169	60	15.84	0.02	0.01743
9	0.0089	0.1	0.856	0.098	170	25.94	1.3×10^{-4}	1.19×10^{-8}
10	0.0037	0.1	0.856	0.041	1,100	69.77	1.0×10^{-7}	2.44×10^{-10}
							Σ	664.586

3) Brown의 소류사량공식

$$\frac{q_B}{u_* d} = 10\left[\frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)^2 g d}\right]^2$$

예제 8.4 하상이 대략 균일한 입경 1.0mm의 모래로 된 하천에 유량이 $320m^3/\sec$, 수심이 1.5m로 흐르고 있을 때의 소류사량를 Brown공식으로 구하라. 단 하폭은 120m, 수면경사 0.8×10^{-3}, 모래 비중 2.60이다.

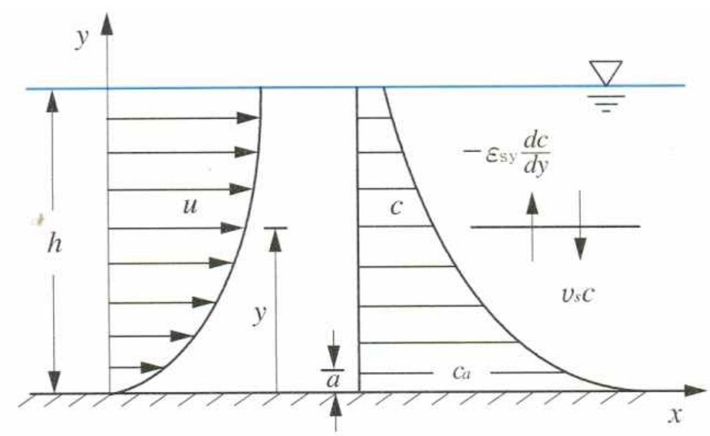
(풀이) $u_* = \sqrt{ghI} = \sqrt{9.8 \times 1.5 \times 0.8 \times 10^{-3}} = 0.11 m/\sec$

$$q_B = u_* \cdot 10\left[\frac{u_*^2}{(\rho_s/\rho - 1)^2 g d}\right]^2 d = 0.11 \times 10 \times \left[\frac{0.11^2}{(2.6-1)^2 \times 9.8 \times 0.001}\right]^2 \times 0.001$$

$$= 6.5 \times 10^{-4} m^3/\sec/m$$

$$\therefore Q_B = B \cdot q_B = 120 \times 6.5 \times 10^{-4} = 0.078 m^3/\sec$$

8.2 부유사량



1) 부유사 구하는 기본식

정상상태 2차원 등류에 관한 단위시간 및 단위폭당의 부유사량 q_s는 다음식과 같다.

$$q_s = \int_a^h u(y)c(y)dy \qquad (8-37)$$

여기서, h: 수심, $u(y)$:하상면상 y점에서 시간평균유속, $c(y)$:하상면상 y점에서 농도, a: 일반적으로 0.5d 혹은 0.05h이다. 실제 계산에서는 다음식의 형태를 취한다.

$$q_s = qc_a p_{*_i} \qquad (8-24)$$

여기서, q : 단위폭당 유량, C_a : 기준점($y=a$) 농도, p_{*_i} : $u(y)c(y)$의 수치적분

부유사 농도 단위(ppm) : 물 $1m^3$에 몇 g의 토사가 포함되어 있는가를 나타냄.

$$\begin{aligned} 1ppm &= 1g/m^3 \\ &= 1mg/l \end{aligned}$$

$$c(ppm) = 2.65 \times 10^6 q_s/q$$

① Rouse 농도분포식

$$\frac{C}{C_a} = [(\frac{h-y}{y})(\frac{a}{h-a})]^Z$$

여기서 $Z = v_s/\kappa u_*$이며 $Rouse$수라고 한다.

② 대수분포 유속식

$$\frac{u}{u_*} = 5.75\log(30.2xy/d_{65})$$

③ 부유사량 공식

$$q_s = \int_a^h u(y)c(y)dy$$

$$= \int_a^h u_*[5.75\log(30.2xy/d_{65})] \bullet C_a[(\frac{h-y}{y})(\frac{a}{h-a})]^Z dy$$

$$q_s = 11.6u_*C_a a(p_1 I_1 + I_2)$$

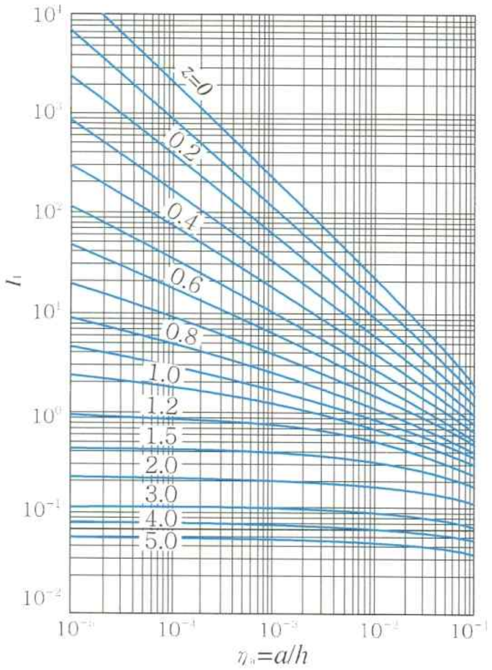
$$\text{여기서}, p_1 = 2.30\log(30.2hx/d_{65})$$

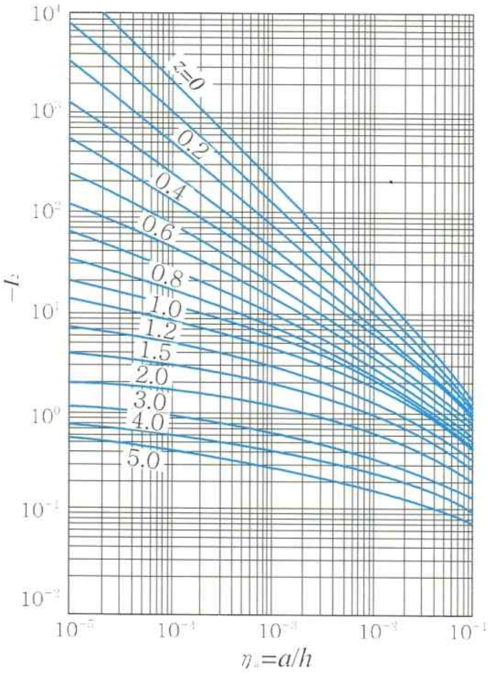
$\Phi = \dfrac{V}{u_*}, \eta_a = a/h$라 하면

$$q_s = qC_a(11.6\eta_a/\Phi)(p_1 I_1 + I_2)$$

여기서, $I_1 = [0.216\eta_a^{Z-1}/(1-\eta_a)^Z]\int_{\eta_a}^1 [(1-y)/y]^Z dy$

$$I_2 = [0.216\eta_a^{Z-1}/(1-\eta_a)^Z]\int_{\eta_a}^1 [(1-y)/y]\ln y dy$$





예제 8.5 예제 8.4에 대한 부유사량을 계산하라. 단 a는 0.02m, 사립의 형상계수 0.7, 동점성계수는 $1.0\times10^{-6}m^2/\sec$, C_a는 2.95이다.

(풀이) 평균유속 $V=\dfrac{Q}{A}=320/(1.5\times120)=1.78m/\sec$

마찰속도 $u_* = \sqrt{ghI}=\sqrt{9.8\times1.5\times0.8\times10^{-3}}=0.11m/\sec$

$\Phi = V/u_* = 1.78/0.11 = 16.2$

층류저층두께 $\delta=\dfrac{11.6\nu}{u_*}=\dfrac{11.6\times1.0\times10^{-6}}{0.11}=1.0\times10^{-4}m$

$d_{65}\simeq d=0.001m,\ \dfrac{d_{65}}{\delta}=\dfrac{0.001}{1.0\times10^{-4}}=10,\quad x\simeq1.0$

침강속도 $v_s\simeq0.14m/\sec$

$Z=\dfrac{v_s}{\kappa u_*}=\dfrac{0.14}{0.4\times0.11}\fallingdotseq3.20,\quad a=0.02\qquad \eta_a=a/h=0.02/1.5=0.013$

$I_1=0.19,\ I_2=-0.80$

부유사량은

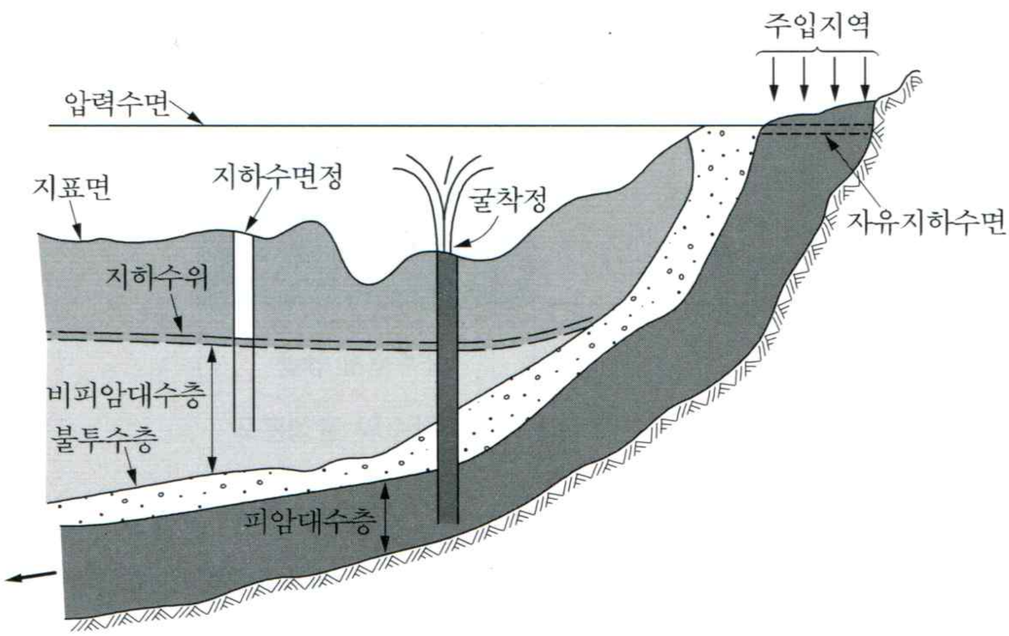
$$q_s = qC_a(11.6\eta_a/\Phi)[2.30\log(30.2hx/d_{65})I_1 + I_2]$$

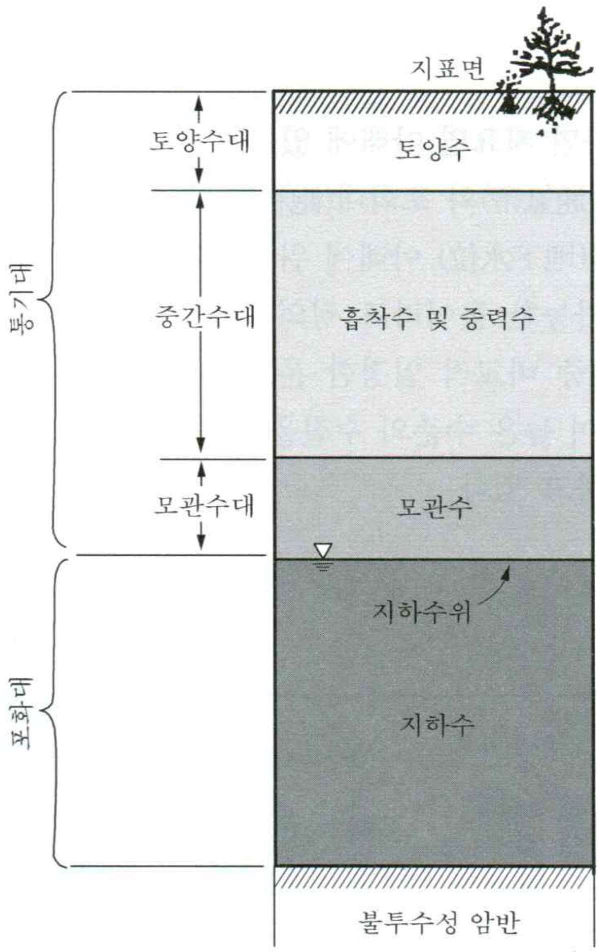
$$= 2.67 \times 2.95 \times (11.6 \times 0.13/16.2) \times [2.30\log(30.2 \times 1.5 \times 1.0/0.001) \times 0.19 - 0.80]$$

$$= 1.938m^3/\sec/m$$

제9장 지하수

9.1 대수층





・지층수 　　자유수면 지하수
　　　　　　피압 지하수

・열거수(finure water)
암석의 균열부에 맥상으로 차 있으면서 유동하는 것

＊대류수(代流水 : Under ground water)
하상(河床)이 모래, 자갈층일 때 삼투성이 크고 지하수위가 얕아 하천의 물이 전부 삼투하여 지하를 흐르는 것

= 지하수 탐사방법 =

① 수문 지질학적 탐사(이론적 규명)
지질구조, 지층경사로부터 대수층의 존재 여부와 지하수 개발 가능성 추측

② 물리적 탐사
- ・전기탐사 : 대수층 탐사
- ・전기검층 : 대수층 위치 성상(性狀), 수질 측정
- ・지질탐사 : 지질의 성상(性狀)이나 구조탐사
- ・방사능탐사 : 200 - 800m의 대수층 탐사

③ 양수시험

= 지하수 이용상 장단점 =

장점

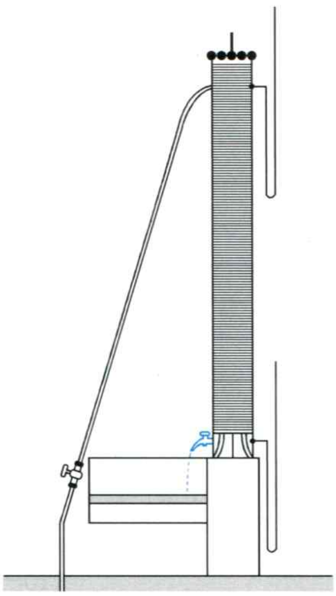
① 계절의 변화가 없다
② 수원 시설비가 적다
③ 긴 도수시설이 필요 없다
④ 시설부지가 필요 없다
⑤ 홍수피해가 적다
⑥ 수리 관계가 간단

단점

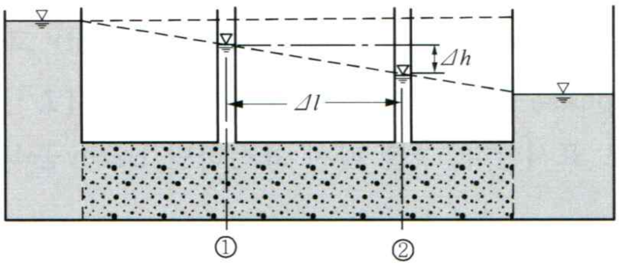
① 용수(湧水)능력에 한계가 있다
② 관개용수가 부적합(온도)
③ 수원시설 수명이 짧다
④ 과도 취수시 지반이 침하, 함몰 우려

9.2 Darcy 법칙(지하수 흐름의 기본방정식)

모세관 현상을 고려하지 않으면 지하수면에는 대기압이 작용하고 흐름은 중력에 의한다.



(a) Darcy의 실제실험장치



(b) Darcy의 법칙을 유도하기 위한 간략도

Darcy의 이론유속 $V = \dfrac{Q}{A}$

실제 조사에는 유효간극율 n_e에 해당하는 부분만 물이 통과하므로 지하수의 통수단면적은 An_e이다.

흙속의 실제유속을 침윤유속 V_0라 하면

$$V_0 A n_e = A V$$

$$V_0 = \frac{V}{n_e}$$

그림에서 dl 구간에 토사를 넣고 물을 통과시킬 때 손실수두가 dh라면

$$V \propto \frac{dh}{dl} \qquad V \propto I$$

$$V = -K\frac{dh}{dl}, \quad V = KI$$

K : 투수계수 (m/sec) : 속도차원을 갖고 점성계수 · 토사입경 · 공극율에 따라 변함

* $V \equiv K\frac{dh}{dl}$ 에서 dh는 속도의 1승에 비례하므로 Darcy의 법칙은 Reynolds수가 4 이하인 **층류**에서만 적용된다.

유량 $Q = AV = K\frac{dh}{dl}A$

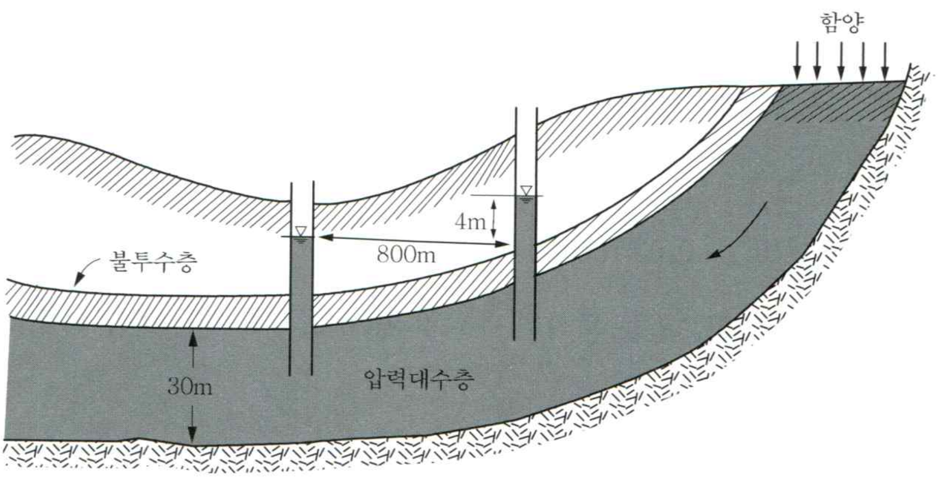
$Q = KIA \ (m^3/\mathrm{sec})$: 지하수의 유량공식

예제 9.1 압력대수층의 투수계수가 50m/day, 공극률이 0.2이다. 800m 떨어진 두 지점에 위치한 우물의 수위가 각각 45m, 49m이다. 압력대수층의 두께가 30m, 평균폭이 3km이다.

(a) 대수층을 통해 흐르는 유량을 구하라.

(b) Darcy속도와 침윤속도를 구하라.

(c) 4km 하류지점까지의 유하시간을 구하라.



(풀이) (a) 흐름단면적 $A = 30 \times 3000 = 9 \times 10^4 m^2$

동수경사 $I = \frac{49-45}{800} = 5 \times 10^{-3}$

유량 $Q = KIA = 50 \times 5 \times 10^{-3} \times 9 \times 10^4 = 22500 m^3/day$

(b) Darcy 속도

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{22500}{9 \times 10^4} = 0.25m/day$$

침윤유속은

$$V_0 = \frac{V}{n_e} = \frac{0.25}{0.2} = 1.25m/day$$

(c) 4km 하류까지 유하시간

$$t = \frac{l}{V_0} = \frac{4000}{1.25} = 3200days$$

9.3 투수계수 결정법

<경험공식>

(1) Hazen 식

$$K = Cd_e^2(0.7 + 0.03t)\,(cm/\sec)$$

여기서, t는 수온(^0C)이고, d_e는 토사 유효입경(cm), 보통 d_{10}을 의미한다.

상수 $C = 50 \sim 150 \simeq 116$

(2) Cozeny 식

$$K = \frac{0.0084}{\mu}\frac{n_e^3}{(1-n_e)^2}d_{10}^2\ (cm/\sec)$$

여기서, μ : 점성계수

n_e : 공극률

d_{10} : 체통과률 10%의 입경(cm)

<실내 시험법>

(1) 정수두 시험법

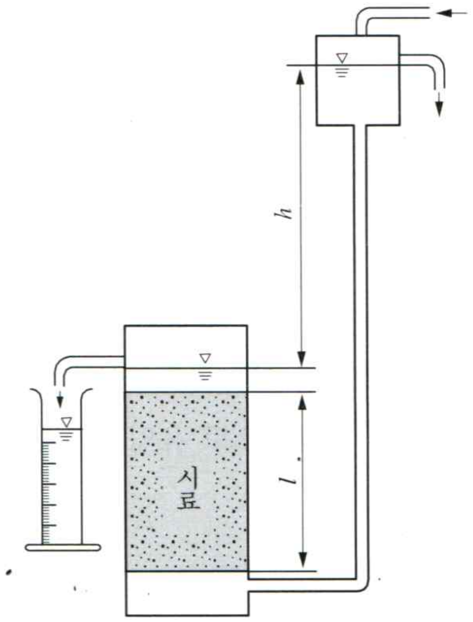
$$V = \frac{Q}{A} = K\frac{h}{l}$$

$$K = \frac{Ql}{Ah}$$

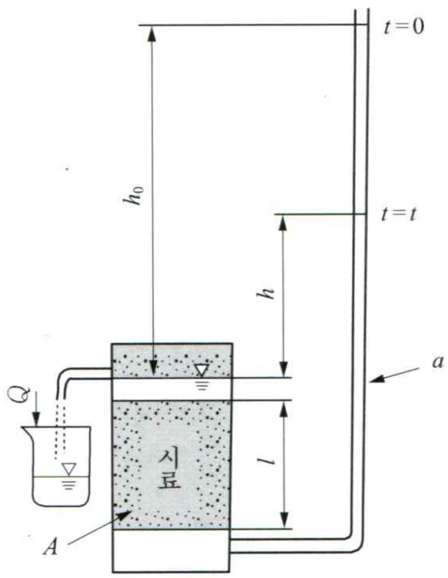
(2) 변수두 시험법

$$K = \frac{al}{A}\frac{1}{t-t_0}ln(\frac{h_0}{h})$$

$$= 2.3\frac{al}{A(t-t_0)}log(\frac{h_0}{h})$$

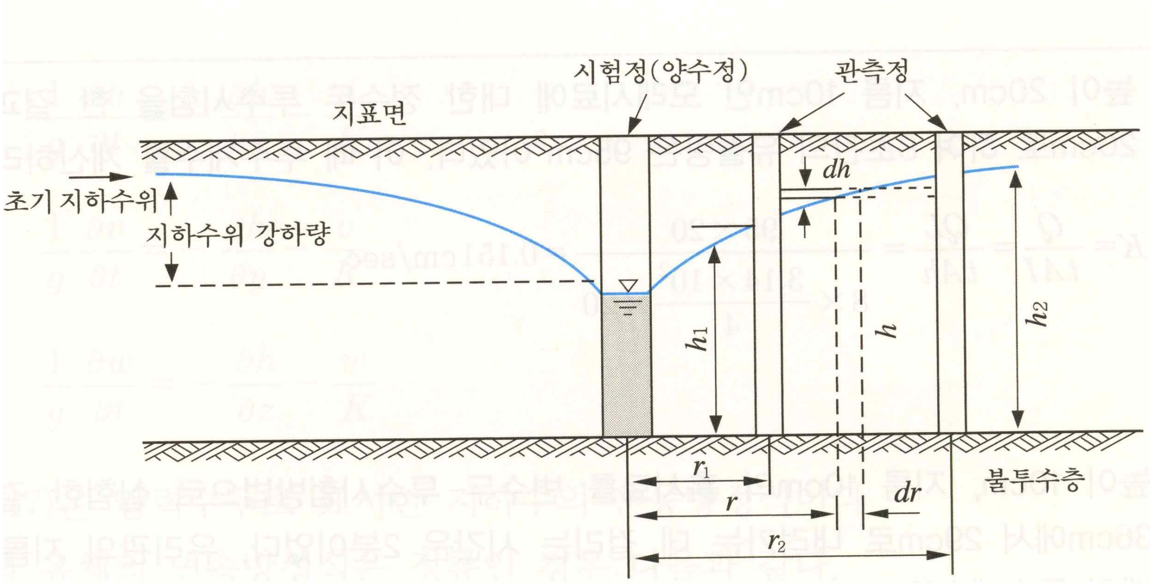


(a) 정수두투수계수 측정기



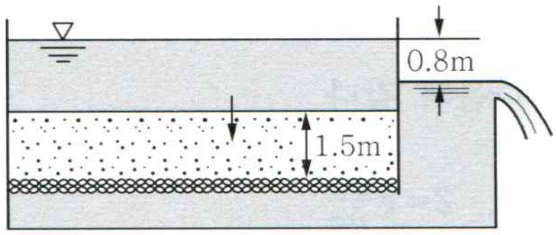
(b) 변수두투수계수 측정기

< 현장시험법>



$$K = \frac{Q\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)} = 2.30\frac{Q\log\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{\pi(h_2^2 - h_1^2)}$$

예제 9.2 그림과 같이 면적 $300m^2$의 여과지가 있다. 모래의 유효입경이 0.3mm, 수온이 10^0C일 때 그 여과 유량은 얼마인가? 단, Hazen공식의 C는 116이다.



(풀이) 투수계수

$$K = C(0.7 + 0.03t)d_e^2$$

$$= 116(0.7 + 0.03 \times 10) \times 0.03^2 = 0.104cm/\sec$$

$$V = K\frac{h}{l} = 0.104 \times \frac{80}{150} = 0.056cm/\sec$$

$$Q = AV = (300 \times 100^2) \times 0.056 = 168000cm^3/\sec$$

$$= \frac{168000 \times 3600}{1000000} = 604.8m^3/hr$$

예제 9.3 높이 20cm, 지름 10cm인 모래시료에 대한 **정수두** 시험을 한 결과 수두를 20cm로 하여 8초간의 유출 체적이 $96cm^3$이였다. 이때 투수계수를 구하라.

(풀이) $K=\frac{QL}{Ah}=\frac{(96/8)\times 20}{(3.14\times 10^2/4)\times 20}=0.151cm/\sec$

예제 9.4 높이 10cm, 지름 10cm 시료를 **변수두** 시험법으로 실험한 결과 수두가 36 cm에서 29cm로 내려가는데 걸리는 시간은 2분이였다. 유리관의 지름이 8mm일때의 투수계수를 구하라.

(풀이) $A=\frac{\pi D^2}{4}=\frac{3.14\times 10^2}{4}=78.5cm^2,\ a=\frac{3.14\times 0.8^2}{4}=0.5cm^2$

$$K=2.3\frac{aL}{A\Delta t}log(\frac{h_1}{h_2})=2.3\times\frac{0.5\times 10}{78.5\times 120}\times\log(\frac{36}{29})$$

$$=1.15\times 10^{-4}cm/\sec$$

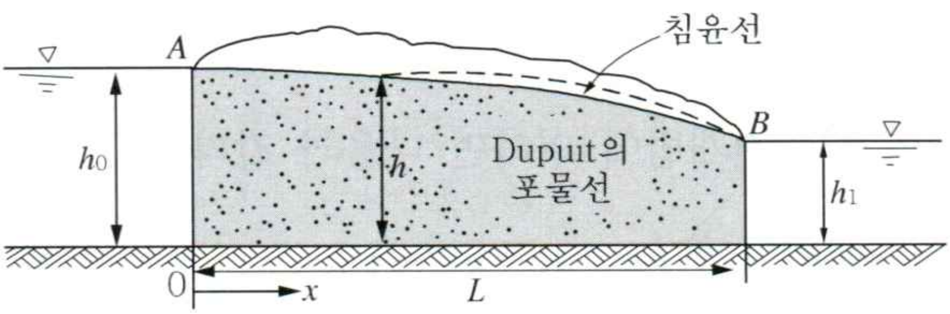
9.4 Dupuit 공식

자유수면을 갖는 지하수 흐름 기본방정식:

$$\nabla^2 h^2+\frac{2R}{K}=0 \quad \text{또는} \quad \frac{d^2h^2}{dx^2}+\frac{2R}{K}=0$$

여기서, R은 소스(source)와 싱크(sink)이다.

Darcy 법칙 : $q=-Kh\frac{dh}{dx}$



$R=0$이면, $\frac{d^2h^2}{dx^2}=0$

$$\int \frac{d^2h^2}{dx^2}dx = 0$$

$$h^2 = ax + b$$

경계조건 $x = 0,\ h = h_0$에서

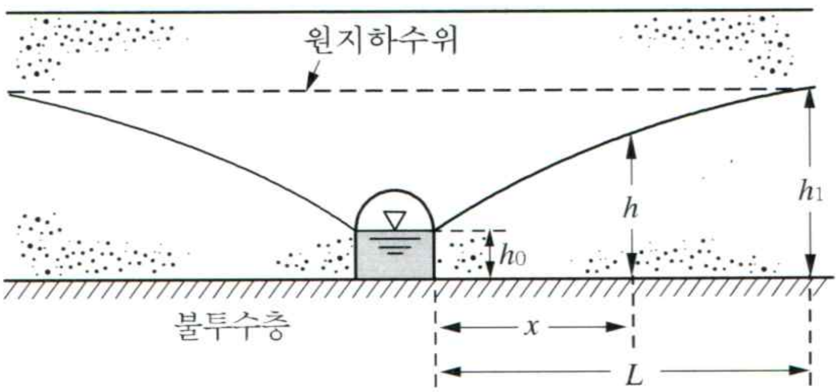
$$b = h_0^2$$

$$\frac{d(h^2)}{dx} = \frac{d(ax+b)}{dx}$$

$$2h\frac{dh}{dx} = a$$

Darcy식으로부터 $h\frac{dh}{dx} = -\frac{q}{K}$

따라서 자유수면 방정식은 $h^2 = -2\frac{q}{K}x + h_0^2$



Dupuit의 방정식은

$$q = \frac{K}{2L}(h_1^2 - h_0^2)$$

예제 9.5 그림과 같은 제방에서 투수계수가 0.003cm/sec일 때 물음에 답하라.

(a) 지표를 통하여 $3.5 \times 10^{-6} cm/\sec$로 지하수가 보충될 때 제방 x방향으로의 단위 폭당 유량을 구하라.

(b) 지표에서 보충되는 유량이 없을 경우 상하류의 수두차에 의한 x방향의 유량을 구하라.

(풀이)

(a) $$\frac{d^2h^2}{dx^2} + \frac{2R}{K} = 0$$

$$\iint \left(\frac{d^2h^2}{dx^2} + \frac{2R}{K}\right)dx = 0$$

$$h^2 + \frac{R}{K}x^2 + Ax + B = 0$$

경계조건 ; $x = 0, h = 15$

$x = 300,\ h = 12$

$$15^2 + \frac{3.5 \times 10^{-6}}{0.003} \times 0.0 + A \times 0.0 + B = 0$$

$$B = -225$$

$$12^2 + \frac{3.5 \times 10^{-6}}{0.003} \times 300^2 + 300A + B = 0$$

$$A = -0.08$$

따라서 $$h^2 = -\frac{3.5 \times 10^{-6}}{0.003}x^2 + 8.0 \times 10^{-2}x + 225$$

단위폭당 유량 $q = -Kh\dfrac{dh}{dx}$

$$\frac{dh^2}{dx} = \frac{d}{dx}\left(-\frac{3.5\times10^{-6}}{0.003}x^2 + 8.0\times10^{-2}x + 225\right)$$

$$h\frac{dh}{dx} = -\frac{3.5\times10^{-6}}{0.003}x + \frac{1}{2}\times8.0\times10^{-2}$$

따라서

$$q = -0.003\left(-\frac{3.5\times10^{-6}}{0.003}x + \frac{1}{2}\times8.0\times10^{-2}\right)$$

x=0일 때 $q = -3.0\times10^{-5}\times4.0\times10^{-2} = -1.2\times10^{-6}m^3/\mathrm{sec}/m$

$$= -0.104m^3/day/m$$

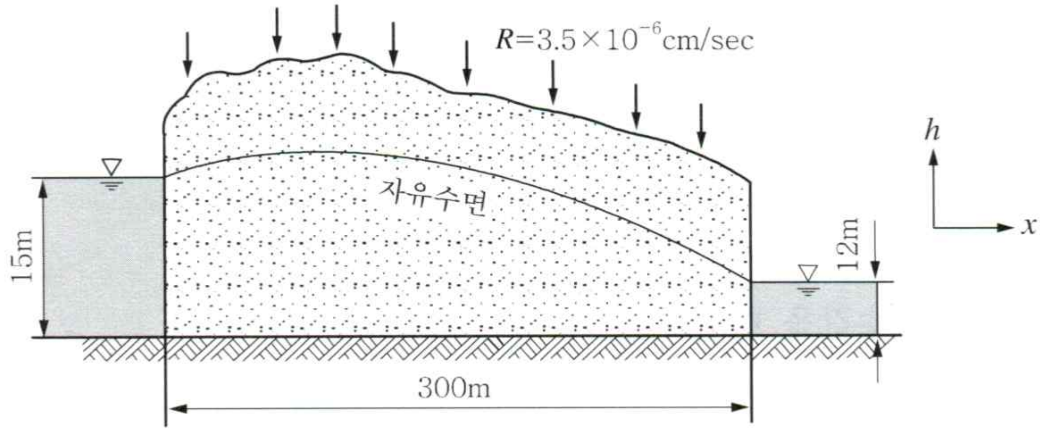
x=300일 때 $q = -3.5\times10^{-8}\times300 - 1.2\times10^{-6}m^3/\mathrm{sec}/m$

$$= 0.8038m^3/day/m$$

x=34.28 일 때 $q = 0$

(b) $$q = \frac{K}{2L}(h_0^2 - h_1^2) = \frac{3.0\times!0^{-5}}{2\times300}(15^2 - 12^2)$$

$$= 4.05\times10^{-6}m^3/\mathrm{sec}/m = 0.350m^3/day/m$$

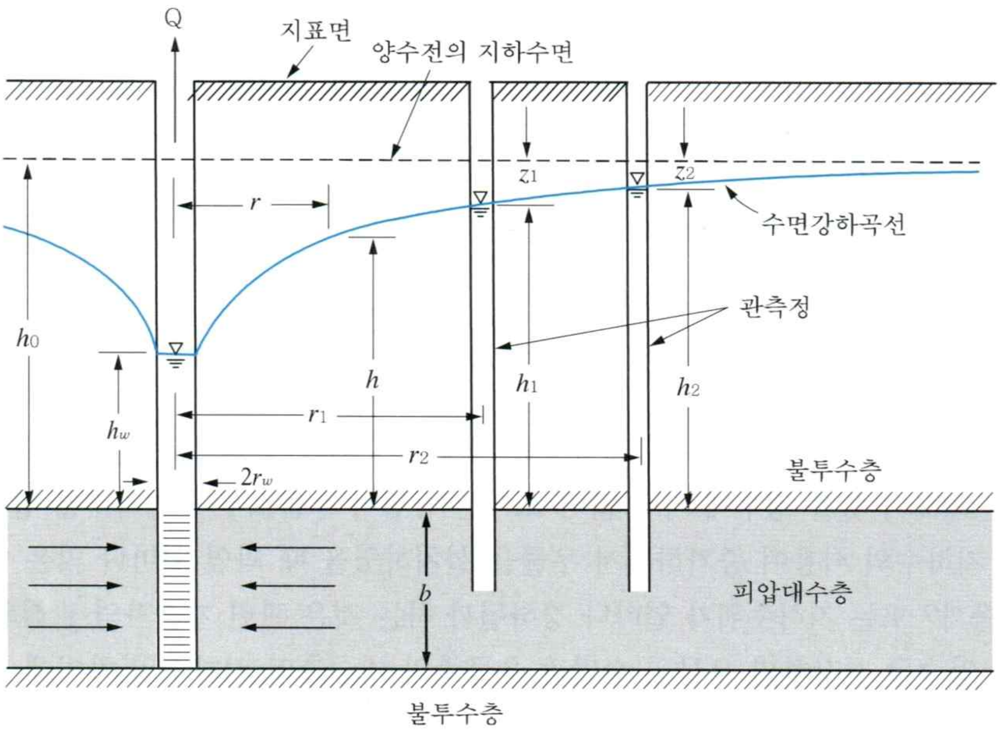


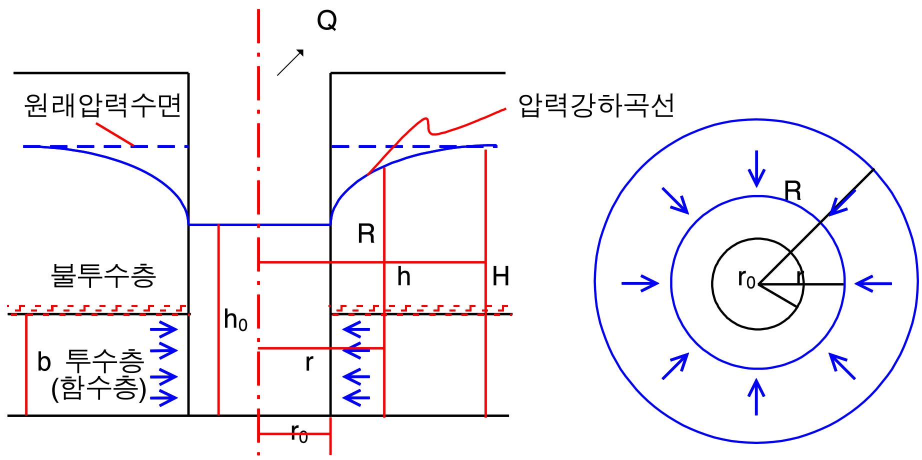
9.5 우물물의 수리

집수정으로의 방사상 정상류

[1] (굴)착정

집수정은 불투수층 사이에 있는 투수층(함수층)까지 파면 집수정의 수면은 함수층(含水層)의 수압에 해당하는 높이까지 상승한다.





두께 b인 수평투수층에 반지름 r_0인 집수정을 만들어 계속 Q를 퍼 올려 정상적인 흐름이 되었을 때 집수정 수심을 h_0라 하면

이때 등수위선(等水位線)은 집수정을 중심으로 하는 등심원이 된다.
반지름 방향의 유속 v_r은
Darcy의 법칙에 의하여

$$v_r = -K\frac{dh}{dl}$$

유량은 연속방정식에서

$$Q = Av_r$$

$$= -2\pi rb(-K\frac{dh}{dl})$$

$$= 2\pi rb(K\frac{dh}{dl})$$

$$dh = \frac{Q}{2\pi rb}\cdot\frac{dr}{r}$$

이것을 h = h_0, r = r_0 조건에서 적분하면

$$\int_{h_0}^{h} dh = \frac{Q}{2\pi bK}\int_{r_0}^{r}\frac{dr}{r} \rightarrow \int_{x_0}^{x}\frac{dx}{x} = \ln\frac{x}{x_0} = 2.3\log\frac{x}{x_0}$$

$$[h]_{h_0}^{h} = \frac{Q}{2\pi bK}ln\frac{r}{r_0}$$

$$h - h_0 = \frac{Q}{2\pi bK}2.3\log\frac{r}{r_0}$$

그런데
r = ∞이면 h = ∞이므로 불합리하다.
실제는 r → ∞여도 h = H이므로
때문에 r = R이고 h = H가 된다.

$$\therefore\ H - h_0 = \frac{Q}{2\pi bK}2.3\log\frac{R}{r_0}$$

$$Q = \frac{2\pi bK}{2.30\log\frac{R}{r_0}}(H - h_0)$$ (굴착정의 양수량 공식)

계산시
R = r_0 x (3000 ~ 5000)
= 500m ~ 1Km 사용하여도 무관.

예제 9.6 직경 1m인 굴착정이 있다. 처음의 수심이 8m이 었으나 계속된 양수에 의해 수위가 2m 강하하였다. 이 때의 양수량을 구하라. 단, 대수층의 두께는 3m, 투수계수는 0.14m/sec, 영향원의 반경은 500m이다.

(풀이)

$$H = 8m, h_0 = 8.0 - 2.0 = 6.0, b = 3m, R = 500m, r_0 = 0.5m, K = 0.0014m/\sec$$

$$Q=\frac{2\pi bK}{2.30\log\frac{R}{r_0}}(H-h_0)$$

$$=\frac{2\times 3.14\times 3.0\times 0.0014}{2.30\log\frac{500}{0.5}}\times(8-6)$$

$$=0.0076m^3/\sec=7.6l/\sec$$

[2] 깊은 우물(深井 : Deepwell)

불투수층 위에 있는 투수층에 만들 집수정 바닥이 불투수층에 닿아있는 것.

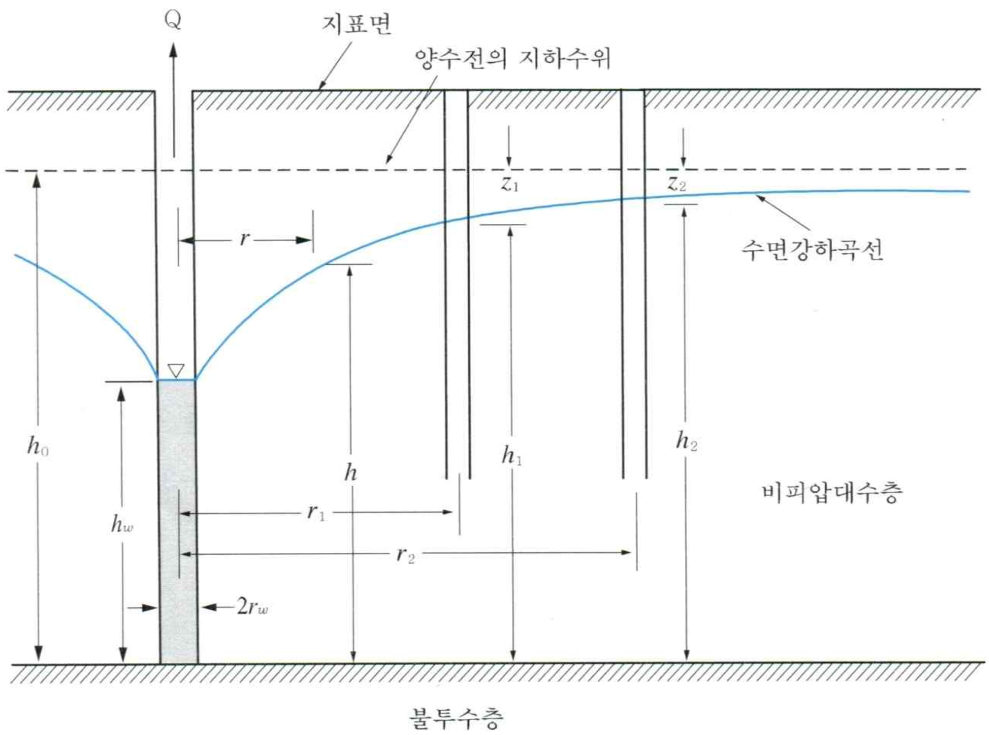
①기계로 판 수직 우물

②피압면 지하수 대상

③양수시설 : 수중모타

④지름 : 300mm이내

깊이 : 몇 백 m에서 100mm ~ 200mm인 것이 많음.



반지름이 방향의 유속 v_r는 Darcy 법칙에 의하여

$$v_r = K\frac{dh}{dr}$$

유량은 연속방정식에서

$$Q = 2\pi rnK\frac{dh}{dr}$$

$$\therefore \ hdh = \frac{Q}{2\pi K}\frac{dr}{r}$$

$h = h_0$이고 $r = r_0$ 조건에서 적분하면

$$\int_{h_0}^{h} hdh = \frac{Q}{2\pi K}\int_{r_0}^{r}\frac{dr}{r}$$

$$[\frac{1}{2}h^2]_{h_0}^{h} = \frac{Q}{2\pi K}2.3\log\frac{r}{r_0}$$

$$h - h_0 = \frac{Q}{\pi K}2.3\log\frac{r}{r_0}$$

$r = R$일 때 $h = H$이므로

$$H^2 - h_0^2 = \frac{Q}{\pi K}2.3\log\frac{R}{r_0}$$

$$Q = \frac{\pi K}{2.3\log\frac{R}{r_0}}(H^2 - h_0^2)$$ (심정의 양수량 공식)

예제 9.7 불투수층이 지표하 10m의 위치에 있고 지하수면이 지표하 4m인 곳에 있다. 지금 지름 2m의 심정을 만들어서 $8l/\sec$의 물을 양수하면 우물의 수위는 얼마나 강하할까? 단, 투수계수는 0.10cm/sec, 영향원의 반경은 800m로 한다.

(풀이) $H = 10 - 5 = 6m$

$$R = 800m,\ r_0 = 1.0m,\ Q = 8l/\sec = 0.008m^3/\sec$$

$$k = 0.10cm/\sec = 0.001m/\sec$$

$$Q = \frac{\pi K}{2.3\log\frac{R}{r_0}}(H^2 - h_0^2)$$

$$h_0 = \sqrt{H^2 - \frac{Q}{\pi K} \times 2.30\log\frac{R}{r_0}}$$

$$= \sqrt{6^2 - \frac{0.008}{3.14 \times 0.001} \times 2.30\log\frac{800}{1}}$$

$$= 4.36m$$

$$\therefore \text{수면강하} = 6 - 4.36 = 1.64m$$

[3] 얕은 우물(淺井 : shallow well)

바닥이 불투수층에 도달하지 않은 집수정으로 우물의 수면이 대수층보다 높아지지 않는 우물

①인공으로 판 수직우물

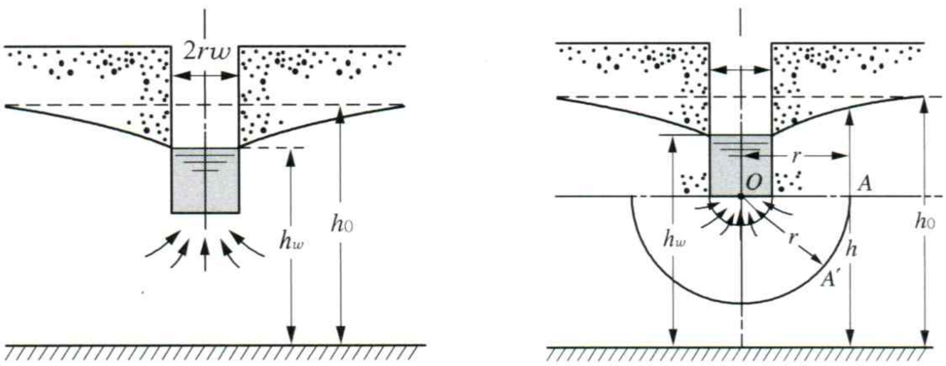
②자유면 지하수 대상

③양수시설 : 펌프(수동식), 도르래

④지름 : 1m 내외

깊이 : 2 - 3m에서 5 - 6m(30m 이내)

⑤주변은 불투수층이고 바닥에서 취수

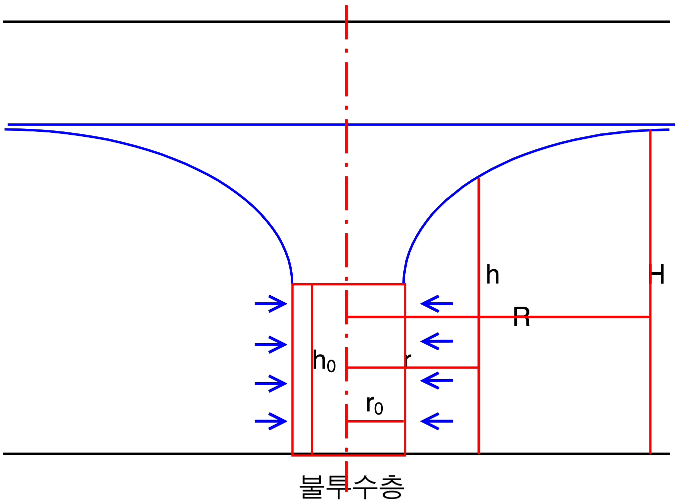


Forchheimer에 의하여

$$h_0 - h_w = \frac{Q}{4r_0K}$$

$$Q = 4\pi r_0 K(h_0 - h_w)$$

<불투수층에 달하는 집수암거>



h_0 : 암거속의 수위

h : x지점의 지하수위

l : 암거길이(x에 직각방향)

q : 단위 길이당 한쪽 유량

x방향의 유속 v_x는 Darcy 법칙에 의하여

$$v_x = K\frac{dh}{dr}$$

단위 길이당 유량은

$$q = Av_x$$

$$= hK\frac{dh}{dx}$$

$$\therefore \ hdh = \frac{q}{K}dx$$

$x = 0$일 때 $h = h_0$ 조건에서

적분하면

$$\int_{h_0}^{h} hdh = \frac{q}{K}\int_{0}^{x} dx$$

$$[\frac{1}{2}h^2]_{h_0}^{h} = \frac{q}{K}x$$

$$\frac{1}{2}(h^2 - h_0^2) = \frac{q}{K}x$$

그런데

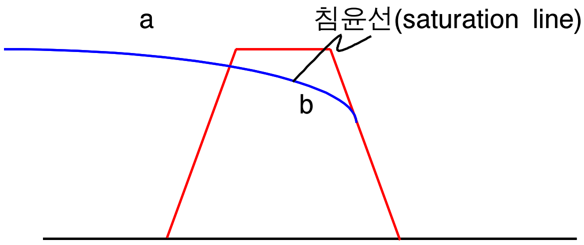
$x = R$ 일 때 $h = H$이므로

$$\frac{1}{2}(H^2 - h_0^2) = \frac{q}{K}R$$

$$q = \frac{K}{2R}(H^2 - h_0^2)$$ (암거 한쪽의 단위 길이당 유량)

$$Q = \frac{Kl}{R}(H^2 - h_0^2)$$ (암거 양쪽의 전유량)

<흙 제방 내부의 침윤선>



① 침윤선의 수분 : 모관작용에 의함.

② 침윤선의 압력 : “0”

③ 침윤선의 경사 : 지하수의 동수경사

④ 침윤선 : 포물선(하류측의 조건에 따라 변화)

⑤ b점 이하에서 침수 : 파괴점의 출발

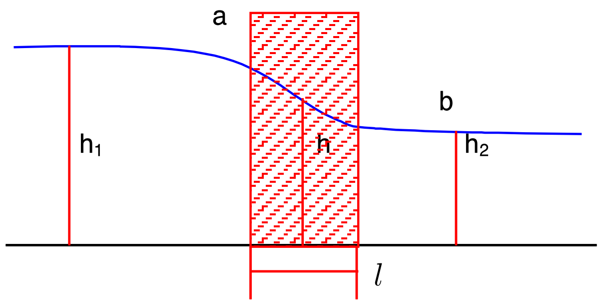
＊설계시 침윤선이 제방하류에 나타나지 않도록 해야 한다.

= Dupuit의 침윤선 가정조건 =

①지하수의 유속이 지하수의 sin(정현)대신에 tan(정접)에 비례

②흐름의 방향은 수평이고 연직면 내의 모든 곳에서 그 크기는 동일.

= 직사각형 제방내부의 침윤선 =



h_1, h_2 : 제방의 상하류 수심

l : 제방의 두께

a, b : Dupuit의 침윤선(가정)

동수경사가 작다고 가정하면

x방향의 유속 v_x는

Darcy의 법칙에 의해서

$$v_x = -K\frac{dh}{dx}$$

단위 길이당 유량 q는

단위 길이당 유량은

$$q = Av_x$$

$$= hK\frac{dh}{dx}$$

$$\therefore \ hdh = \frac{q}{K}dx$$

$x = 0$일 때 $h = h_0$ 조건에서 적분하면

$$\int_{h_0}^{h} hdh = \frac{q}{K}\int_{0}^{x} dx$$

$$[\frac{1}{2}h^2]_{h_0}^{h} = \frac{q}{K}x$$

$$\frac{1}{2}(h^2 - h_0^2) = \frac{q}{K}x$$

$h_1^2 - h^2 = \frac{2q}{K}x$ (Dupuit의 침윤선 공식)

그런데 $x = 1$일 때 $h = h_2$ 이므로

$$\therefore h_1^2 - h_2^2 = \frac{2q}{K}l$$

$q = \frac{K}{2l}(h_1^2 - h_2^2)$ (침윤선의 침투유량)