제 4 장 오리피스와 웨어

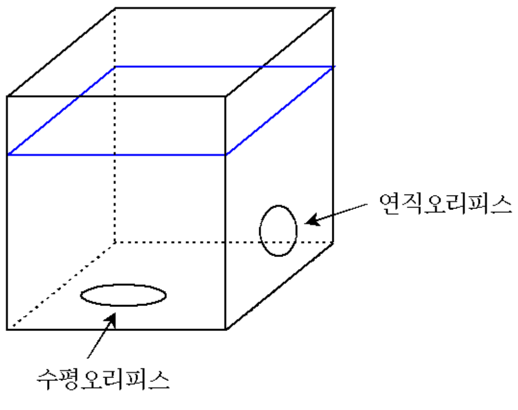
4.1 개요

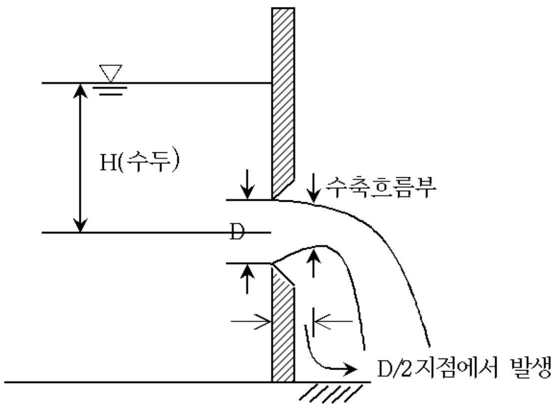
- 오리피스와 웨어는 흐름의 계측 등에서 가장 널리 사용되는 원리이자 수공구조물임
- 흐름계측의 주요 목적은 수리현상들을 양적으로 측정하여 흐름의 원리를 이해하는 것과, 수리구조물의 계측, 설계 및 관리에 필요한 자료를 제공하기 위함
- 일반적으로 측정을 요하는 수리량은 기하학적, 수리량, 역학적 수리량으로 구분
  - 기하학적 수리량 : 수심, 수위, 수로폭, 관경, 벽면의 조도 등
  - 운동학적 수리량 : 유속, 가속도, 압력강도 유량 등
  - 역학적 수리량 : 밀도, 점성계수, 단위중량, 표면장력, 체적탄성계수 등

4.2 오리피스

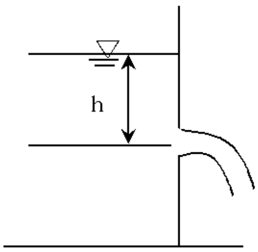
가. 오리피스(Orifice)

- 오리피스 수조의 측벽이나 바닥에 구멍을 뚫어서 물을 유출시킬 때 이 구멍을 말함.
- 오리피스에서의 흐름의 발생은 수축단면 발생에 의해 특성지워지며 단면수축계수와 유속계수에 영향을 미쳐서 유량계수가 결정됨
- 오리피스는 작은 오리피스(small orifice), 큰 오리피스(large orifice) 그리고 수중 오리피스(submerged orifice)로 구분됨

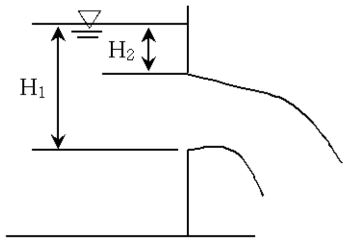




① 작은 오리피스(H > 5D : 수두1개)



② 큰 오리피스(H < 5D : 수두2개)



나. 작은 오리피스(Small Orifice)

- 오리피스의 상하점의 수두차가 작아서 같다고 볼 수 있는 오리피스($h > 5d$)

1) 작은 오리피스의 유속 및 유량(접근유속 무시)

- 이론유속은 토리첼리 정의에 의해 $V = \sqrt{2gh}$
- 실제유속은 $V_0 = C_v\sqrt{2gh}$ 으로

  - Ca(수축계수) = $\dfrac{a_0(\text{수축흐름부단면적})}{a(\text{오리피스단면적})} = \dfrac{\dfrac{\pi(0.8D)^2}{4}}{\dfrac{\pi D^2}{4}} = (0.8)^2 = 0.64$

  - Cv(유속계수) = $\dfrac{V_0(\text{실제유속})}{V_t(\text{이론유속})} = 0.97 \sim 0.99(\text{실험치})$

  - C (유량계수) = $C_a \times C_v = (0.64)\times(0.97\sim0.99) \fallingdotseq 0.62$

- 따라서, 작은 오리피스의 유량공식은

$$Q = a_0V_0 = (C_a a)(C_v\sqrt{2gh}) = C_a \cdot C_v\sqrt{2gh}$$
$$= C \cdot a \cdot \sqrt{2gh}$$

여기서 C는 유량계수로 수도 h와 직경에 따라 변하는 비례상수

2) 작은 오리피스의 유속·유량 (접근유속 Va를 고려할 때)

- 접근유속과 접근유속 수두
  - 접근유속(Va : approach velocity) $V_a = \dfrac{Q(\text{유량})}{A(\text{수로의단면적})}$
  - 접근유속수두(Ha : approach head) $H_a = \dfrac{V_a^2}{2g}$

- Bernoulli 방정식 $Z_1+\dfrac{P_1}{W}+\dfrac{V_1^2}{2g}=Z_2+\dfrac{P_2}{W}+\dfrac{V_2^2}{2g}$ 에서 Z_1 = Z_2 = 기준면 = 0이고, 대기압 = 0,

1에서의 유속은 접근유속과 같음 $V_1 = V_a$ 이며 이므로 이를 대입하면 $\dfrac{V_2^2}{2g}=\dfrac{V_a^2}{2g}+H$,

다시 정리하면 $V_2^2 = V_a^2 + 2gh$

- 따라서 접근유속을 고려한 이론유속은 $V_2 = \sqrt{2gH + V_a^2}$

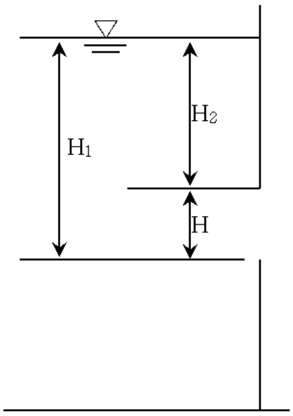
  실제유속은 $V_0 = C_v\sqrt{2gH+V_a^2}$

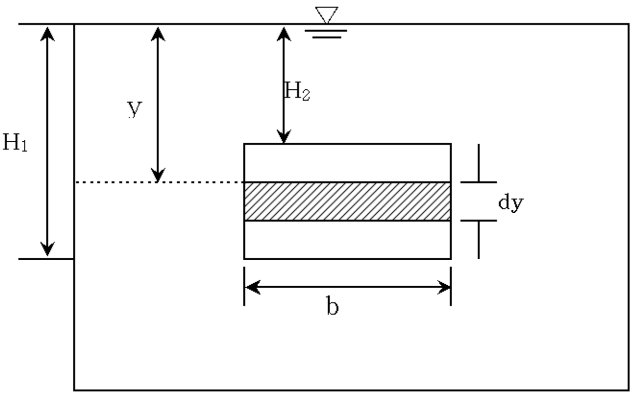
- 유량 Q는 $Q = a_0 \cdot V_0 = C_a \cdot a \cdot C_v\sqrt{2gH+V_a^2} = C \cdot a\sqrt{2gH+V_a^2}$

다. 큰 오리피스(Large orifice)

- 오리피스의 상하점의 수두차가 작아서 같다고 볼 수 있는 오리피스(h > 5d)

1) 직사각형 큰 오리피스





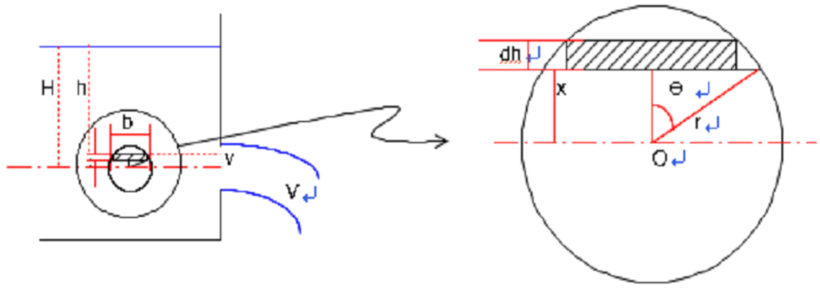
$Q = A \cdot V$ 에서 $\quad dQ = dA \cdot V = (b\,dy) \cdot \sqrt{2gh}$

$\int dQ = b\sqrt{2g}\int_{H_2}^{H_1} y^{1/2} \cdot dy \qquad Q = b\sqrt{2g}\left[\frac{2}{3}y^{3/2}\right]_{H_1}^{H_2} = \frac{2}{3}b\sqrt{2g} \cdot (H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$

$\therefore\ Q = \frac{2}{3}c\,b \cdot \sqrt{2g}\,(H_2^{3/2} - H_1^{3/2})$

※ 접근유속 고려하면 $\quad Q = \frac{2}{3}cb\sqrt{2g}\left[(H_1 + h_a)^{3/2} - (H_2 + h_a)^{3/2}\right]$

2) 원형 큰 오리피스



위와 같은 방법으로 유도하면 Q = $\int_0^{\pi} 2cr^2 \sin^2\theta\, d\theta \sqrt{2g\left(1 - \frac{r}{H}\cos\theta\right)}$

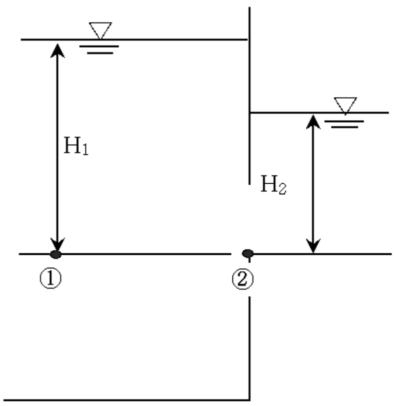
$= 2cr^2\sin^2\theta\sqrt{2gH}\int_0^{\pi}\left(1 - \frac{r}{H}\cos\right)^{\frac{1}{2}} d\theta$

Tayler 급수를 전개하면 Q = $c\pi r^2\sqrt{2gh}\left[1 - \frac{1}{32}\left(\frac{r}{H}\right)^2 + \frac{5}{1024}\left(\frac{r}{H}\right)^4 \cdots\right]$

$= kc\pi r^2\sqrt{2gh}$

라. 수중 오리피스(Submerged orifice)

- 오리피스에서 유출수가 수중으로 들어간 경우



<완전 오리피스>

- 완전오리피스 : 오리피스의 전단면이 수중에 있는 경우
- Bernoulli 정리를 적용

$$Z_1 + \frac{P_1}{W} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{W} + \frac{V_2^2}{2g}$$

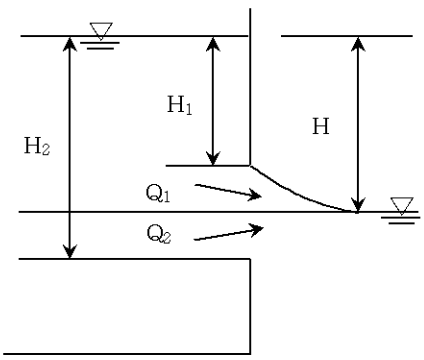
Z1 = Z2 = 기준면 = 0

$$0 + H_1 + 0 = 0 + H_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = H_1 - H_2 \qquad V_2^2 = 2g(H_1 - H_2)$$

$$\therefore\ V_2 = \sqrt{2g(H_1 - H_2)} \quad \therefore\ Q = CA\sqrt{2g(H_1 - H_2)}$$

여기서 C = 0.60 ~ 0.62



<불완전 오리피스>

(1) 상부유량(Q_1) : 보통 오리피스(직사각형 큰 오리피스)

(2) 하부유량(Q_2) : 완전 수중 오리피스

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$= \frac{2}{3}C\ b\sqrt{2g}(H^{3/2} - H_1^{3/2}) + C_a\sqrt{2gh}$$

여기서 C = 0.62, Ca = 0.53

마. Orifice의 배수시간

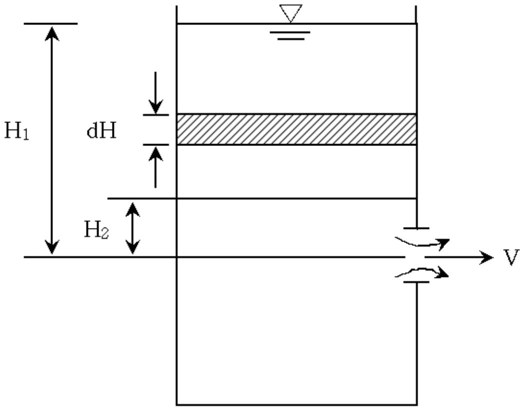
- 연직 Orifice로 물을 유출시킬 때 수심이 H_1에서 H_2로 내려가는데 필요한 시간
- Orifice에서 유출되는 유속과 유량을 $V = C_v\sqrt{2gh}$, $Q = C \cdot A\sqrt{2gh}$ 이고 dt시간의 유량을 dQ라 하면 $dQ = C \cdot A\sqrt{2gh}\,dt$. 따라서 오리피스에서의 유출량으로 수조에서는 $-Adh = C \cdot A\sqrt{2gh}\,dt$의 수량이 감소

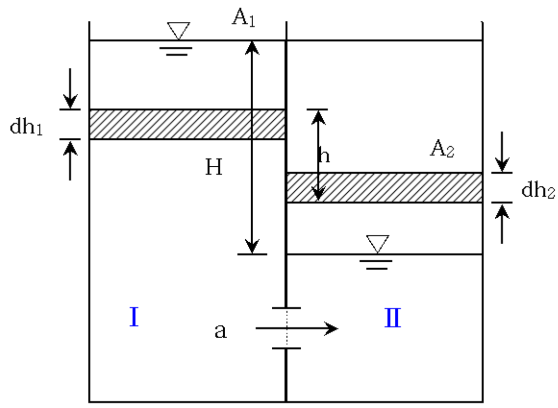
$$\therefore\ dt = -\frac{A}{C \cdot A\sqrt{2GH}}dh$$

- $H_1 \rightarrow H_2$로 되는 소요시간 T를 적분하여 구하면 즉, $T = \frac{2A}{C \cdot A\sqrt{2G}}(H_1^{1/2} - H_2^{1/2})$

- 완전배수 시간은 H_2 = 0 일 때 이므로 $T = \frac{2A}{C \cdot A\sqrt{2g}}H^{1/2}$

(물시계(clepsydra)는 위 식을 이용하여 수두를 일정하게 만든 물탱크)

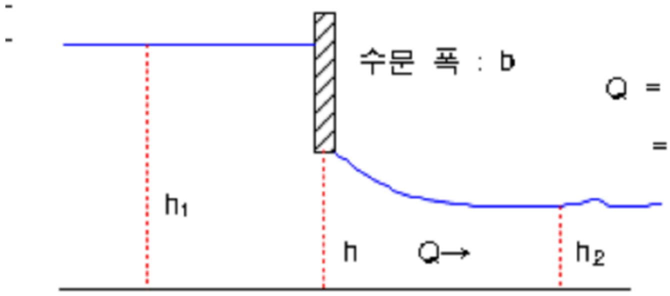




- 수중 Orifice에서 “a”로부터 Ⅰ수조물이 Ⅱ수조로 유출되어 두 수조 수면이 같아지는데 필요한 시간은 $T=\frac{2A_1A_2}{C\,a\sqrt{2g(A_1+A_2)}}H^{1/2}$ 여기서 A_1과 A_2는 수조의 수면적

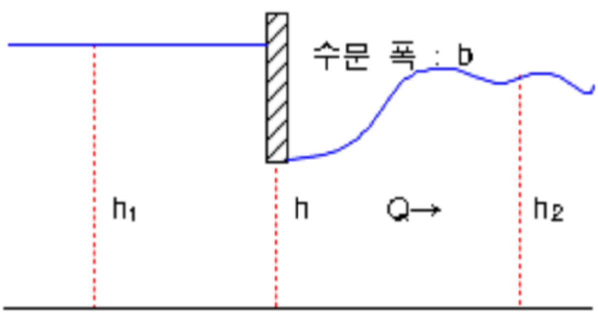
바. 수문(Sluice gate)

- 하류의 수위가 수문높이보다 낮을 때



$$Q = ca\sqrt{2gh}$$
$$= cbh\sqrt{2g(h_1-h)}$$

- 하류의 수위가 수문높이보다 높을 때



$$Q = ca\sqrt{2gh}$$
$$= cbh\sqrt{2g(h_1-h_2)}$$

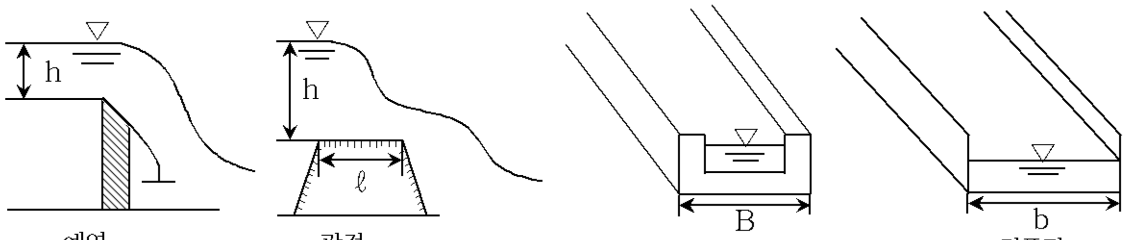
4.3 웨어

- 수로를 횡단하여 설치한 장벽 위를 물이 월류할 때의 장벽을 웨어(Weir)
- 사용목적

○ 유량측정　　　　　　　　　○ 분수(分水)
○ 치수를 위한 수위증가　　　○ 하천유지관리

가. 웨어(Weir)의 종류

- Weir
  - 예연웨어
    - 결구
      - 삼각형weir
      - 사각형weir — 구형 / 제형
      - 사다리꼴weir
    - 전폭
  - 광정웨어 : 월류수심(h)보다 weir 마루폭이 넓은경우



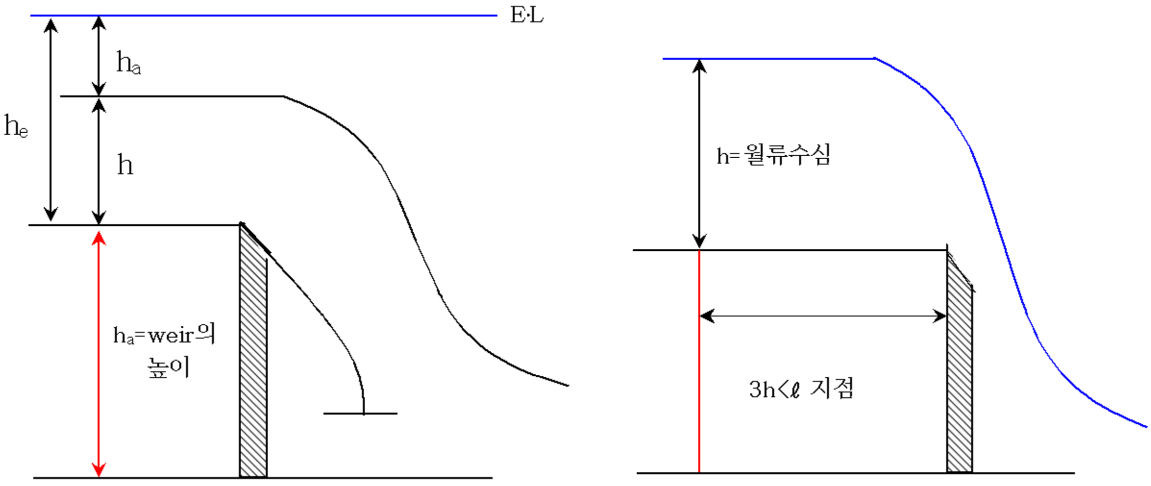
예연　　광정　　결구　　전폭광

나. 웨어의 흐름 특성

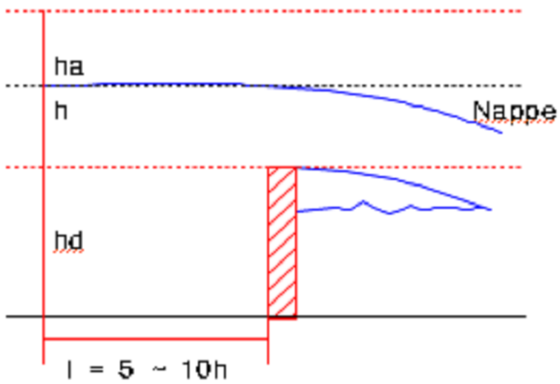
- 전수두 : weir에서 전수두는 측정수두와 접근유속수두를 합한 것

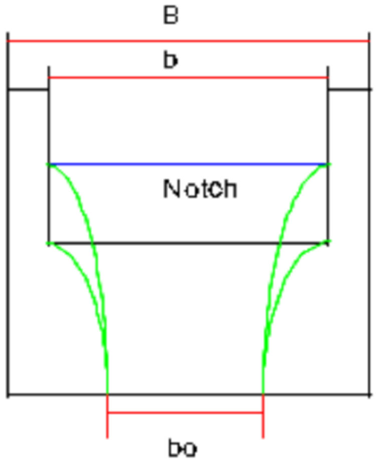
$$H = h(\text{측정수심}) + \alpha\frac{V^2}{2g}(\text{접근유속수두})$$

여기서 α는 에너지보정계수로 1.1의 값을 가지며, 유속이 불규칙하면 커짐



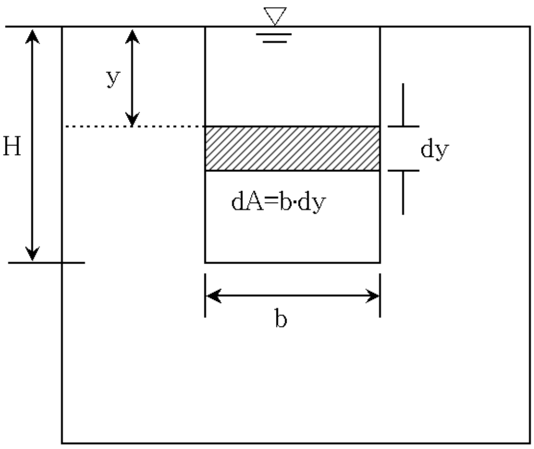
∴ h : weir로부터 상류측으로 3h이상 (보통수로 : 5h~10h 정도에서 측정)





- 용어
  - ㆍNotch(缺口) : 장벽의 일부를 따낸 부분
  - ㆍNappe(수맥) : 장벽을 월류하는 물의 얇은 층
  - ㆍEnd contraction(단수축) : 웨어의 양측에 종으로 벽을 설치하여 폭을 좁힐 때 측벽이웨어의 구실을 하여 이때 수류가 수축한다.
- 월류 수맥(Nappe)의 종류
  - ㆍ완전월류(수맥) : $h \leq 0.4hd$ 이며 h가 너무 작지 않을 때 완전월류가 생기며 수맥의 상하에 대기압이 작용
  - ㆍ불완전월류(수맥) : $h \geq 0.4hd$ 이며 하류수위가 언정보다 낮아도 측판과 수맥사이에 Vertex로 차이며 수맥의 형이 불명료
  - ㆍ부착수면 : $h \ll 0.4hd$이며 월류수의 평균유속이 약해 수맥을 하류의 벽면에 부착하여 낙하
  - ㆍ정확한 유량 측정은 수맥이 완전월류이어야 한다.

다. 사각 웨어의 유량



$$dQ = dA \cdot V_t = b \cdot dy\sqrt{2gy}$$

$$dQ = b\sqrt{2g} \cdot y^{1/2}dy$$

$$\int dQ = b\sqrt{2g}\int_0^H y^{1/2}dy$$

$$Q = b\sqrt{2g} \cdot \frac{2}{3}\left[h^{3/2}\right]_0^H$$

$$Q = \frac{2}{3}C\, b\sqrt{2g} \cdot H^{3/2}$$

• 큰 오리피스 공식에서 $Q = \frac{2}{3} C\ b\sqrt{2g}\left\{(H_2 + H_a)^{3/2} - (H_1 + H_a)^{3/2}\right\}$

H_1=0 일 때 구형웨어가 되므로 윗 식 H_1=0 과 H_2=H를 대입하고 접근유속을 무시하면

$\therefore\ Q = \frac{2}{3} C\ b\sqrt{2g}\,H^{3/2}$ 가 된다.

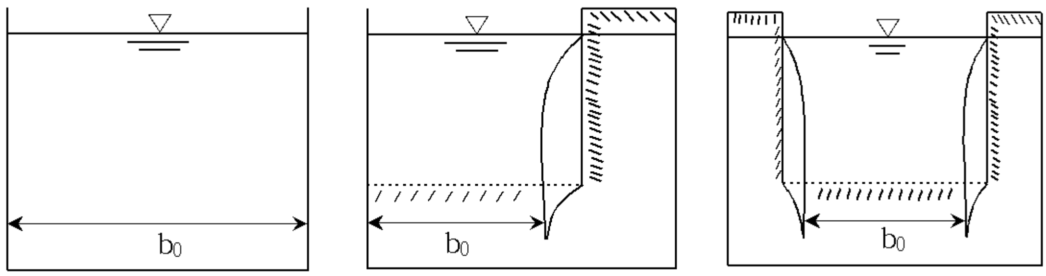
• 유량계수(C)는 weir의 두께, 높이 등에 따라 다르지만 C = 0.623으로 일정하다고 가정하면 Francis 공식의 유도는 다음과 같음

$Q = \frac{2}{3} C\sqrt{2g} = \frac{2}{3} \cdot 0.623 \cdot \sqrt{2 \times 9.8} = 1.838 \ \fallingdotseq\ 1.84$

$\therefore\ Q = 1.84 b_0 \left\{(h + h_a)^{3/2} - ha^{3/2}\right\}$

여기서 접근유속이 작은 경우 $Q = 1.84 b_0 h^{3/2}$, $b_0 = b - \frac{nh}{10}$

n=단수축 (양단수축 n=2, 일단수축 n=1, 단수축 없으면 n=0)



n = 0　　　n = 1　　　n = 2

i) Francis 공식

• $Q = 1.84\left(b - \frac{nh}{10}\right)\left[(h + h_a)^{3/2} - h_a^{3/2}\right]$ => 접근유속을 고려했을때

• $Q = 1.84\left(b - \frac{nh}{10}\right)h^{3/2}$ => 접근유속 무시

• 적용범위 : h=0.19~0.5m, B=3.03~4.24m, Hd=0.6~1.5m, Va=0.06~0.3m/s,

b=2.42~3.0m, ℓ=월류수두 단정위치 1.82m

• Francis 공식은 대형웨어에 대한 것이지만 b=0.5m 정도의 소형 웨어에서도 잘 맞음

ii) Bazin 공식

• $Q = \sqrt{2g} \cdot mb \cdot h^{3/2}$ 　　$m = \left(0.405 + \frac{0.003}{h}\right) \cdot \left\{1 + 0.55\left(\frac{h}{h + h_d}\right)^2\right\}$

• $Q = \left(1.794 + \frac{6.0133}{h}\right) \cdot \left\{1 + 0.55\left(\frac{h}{h + h_d}\right)^2\right\}$

• 이 식은 n=0(단 수축이 없는 경우 : 전폭웨어), 특히 월류수심(h)가 큰 경우 잘 맞음 (다른 공식보다 유량이 2~3%정도 큼)

• 적용범위 : h=0.08~0.5m, b=0.5~2.0m, ℓ=5.0m, h_d=0.75m, B=2.0m

iii) Reh book 공식

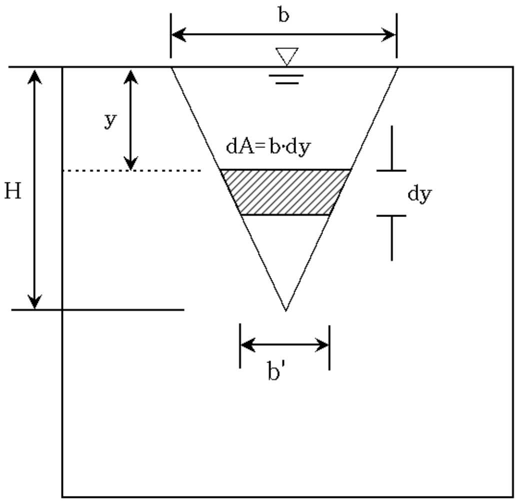
- $Q = \frac{2}{3} C\ b\sqrt{2g}\, h^{3/2}$ $\qquad C = 0.605 + \frac{1}{1000h} + 0.08\frac{h}{h_d}$
- 적용범위 : 수축이 없는 전폭웨어에 대한 것 → 월류수심이 작을 때

iv) 이타다니 식과 데지마 공식(양단 수축이 있는 경우)

- $Q = K \cdot b \cdot h^{3/2}$
- $K = 1.785 + \frac{0.0295}{H} + 0.237\frac{h}{h_d} - 0.428\sqrt{\frac{(B-b)h}{B \cdot h_d}} + 0.034\sqrt{\frac{B}{h_d}}$
- 적용범위 : B=0.5~6.3m, b=0.15~5m, h_d=0.15~3.5m, h=0.03~0.45 $\sqrt{b}$

라. 삼각 웨어의 유량

● 적은 유량의 변화에도 수두에 큰 차이가 생기므로 작은 유량측정에 알맞고 30ℓ/sec이하의 유량에서는 직사각형 웨어보다 정확함



$b : H = b' : H - y \qquad b' = \frac{b(H-y)}{H}$

$\therefore\ dA = b' \cdot dy = \frac{b(H-y)}{H} dy$

미소면적 dA를 통과하는 유속 $V = C_v\sqrt{2gy}$ 라 하고 이때 유량을 dQ라 하면

$\therefore\ dQ = dA \cdot V = C\ b' dy\sqrt{2gy}$

$= \left(\frac{C\ b(H-y)}{H}\right) dy \cdot C_v\sqrt{2g}\, y^{1/2}$

$= \frac{C\ b\sqrt{2g}}{H}(H-y) y^{1/2} dy$

$$\int dQ = \frac{C\ b\sqrt{2g}}{H}\int_0^H (Hy^{1/2} - y^{1/2}) dy$$

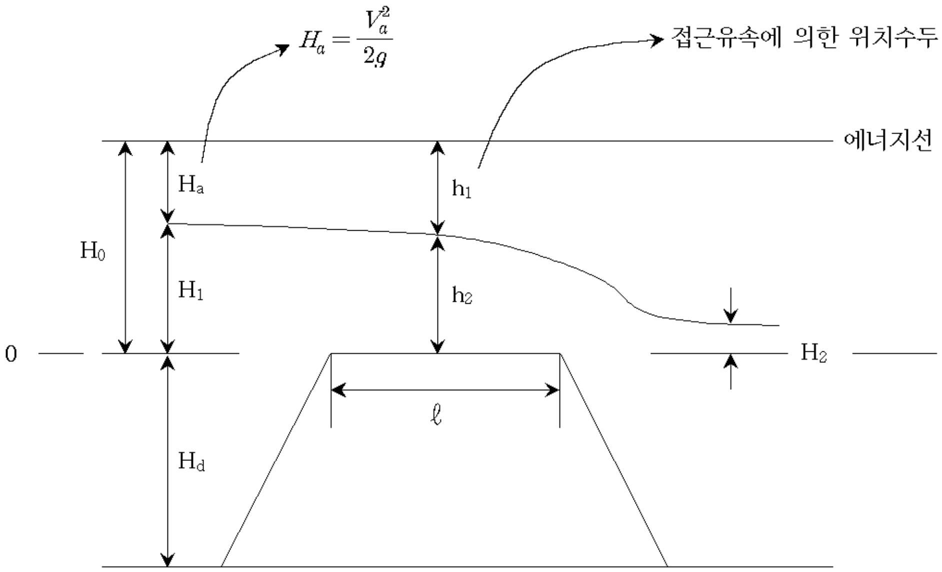
$$Q = \frac{C\ b\sqrt{2g}}{H}\left[\frac{2}{3}Hy^{3/2} - \frac{2}{5}y^{5/2}\right]_0^H = \frac{C\ b\sqrt{2g}}{H}\left(\frac{2}{3}H^{5/2} - \frac{2}{5}H^{5/2}\right) = \frac{4}{15}C\ b\sqrt{2g}\, H^{5/2}$$

$$\therefore\ Q = \frac{8}{15} C \tan\frac{\theta}{2}\sqrt{2g} \cdot H^{5/2}$$

여기서 Θ = 90°일 때 $Q = 1.4 H^{5/2}$

마. 광정 웨어

● 웨어 정부의 폭(L)이 웨어 정부의 수심 h의 70% 이상인 웨어(L > 0.7h)



● 0-0면 기준으로 하여 유속을 Bermoulli정리로 적용하면

$$(H_1 + H_a) + 0 = H_2 + \frac{V_2^2}{2g}, \quad \frac{V_2^2}{2g} = H_0 - H_2, \quad V_2^2 = 2g(H_0 - H_2), \quad V = \sqrt{2g(H_0 - H_2)}$$

$\therefore$ $Q = A \cdot V$에서 weir의 길이를 "B"라 하면 $Q = C(BH_2)\sqrt{2g(H_0 - H_2)}$

● 최대 월류량은 $\frac{\partial Q}{\partial H_2} = 0$에서 $H_2 = \frac{2}{3}H$ 대입하면 $Q = \frac{2}{3}C\,bH\sqrt{2g\left(H - \frac{2}{3}H\right)}$

$\therefore$ $Q = 1.7C\,bH^{3/2}$

● 최대 월류량일때 $H_2 = \frac{2}{3}H$ (H_2=한계수심)

i) 하류수위가 웨어 높이보다 높을 때

H를 비에너지라고 하고 $\frac{2}{3}H$ 값일 때를 최대유량이고, 이때 수심을 한계수심

● 완전월류 : 월류가 하류측에 영향을 받지 않는 상태 $H_2 < \frac{2}{3}H$: 사류인 경우

● 불완전 월류상태 : 월류가 하류측에 영향을 받지 않는 상태 $H_2 > \frac{2}{3}H$: 상류인 경우

● 수중웨어 $H_2 > \frac{2}{3}H$

$$H_e = H + \frac{(\text{접근유속})V_a^2}{2g} = h_c + \frac{(\text{한계유속})V_c^2}{2g}$$

- 여기서 수로폭 B라면 $Q = B\ h_c \cdot V_c$ 한계수심은 Belange법칙에 의하여 $h_c = \frac{2}{3}H_e$

이 경우 이 식은 $H_e = h_c + \frac{V_c^2}{2g} = \frac{2}{3}H_e + \frac{V_c^2}{2g}$ $\quad \therefore\ V_c = \sqrt{\frac{2}{3}gH_e}$

- 따라서 유량 Q는 $Q = Bhc \cdot V_c = \frac{2}{3}BH_e\sqrt{\frac{2}{3}gH_e} = \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2}{3}g}\cdot BH_e^{3/2} = 1.704BH_e^{3/2}$

바. 웨어의 수위와 유량과의 관계

i) 직사각형 웨어

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

이것을 미분하면 $dQ = \dfrac{\frac{3}{2}Kh^{\frac{1}{2}}dh}{Kh^{\frac{3}{2}}} = \frac{3}{2}h^{-1}dh = 1.5\,\frac{dh}{h}$

※ 수두 측정시 x%의 오차가 생기면 유량에는 1.5x%의 오차가 발생한다.

ii) 삼각웨어

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

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

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

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