

댐 (저수지) 취수시설 공기관 설계기법



정 상 옥 |

경북대학교 농업토목공학과 교수
sochung@knu.ac.kr



윤 동 균 |

농어촌연구원 주임연구원
ydkibm@ekr.or.kr

1. 서론

댐 또는 저수지의 취수시설은 취수부분과 도수부분으로 구성된다. 취수부분은 취수탑, 사통, 및 댐 전면 취수시설 등 세 가지가 있다. 도수부분은 터널이나 통관이 이용되며, 일반적으로 도수부분의 상류단에는 수문이 설치된다. 이 때 수문 하류에서 매우 큰 유속이 발생하면 공기 부분에 부압이 발생할 수 있다. 이 부압의 크기는 터널의 형상 및 길이, 유량, 수문의 개도 및 형상에 따라 결정된다. 물속의 절대압력이 물의 증기압까지 내려가게 되면 공동현상이 발생하게 되고, 소음 및 진동에 의하여 수문 작동에 방해가 될 수 있으며 도관은 침식 (pitting) 등으로 파손에 이를 수도 있다.

공동현상으로 피해를 입은 댐의 첫 번째 예는

1908년에 건설된 미국의 Roosevelt 댐이다. 이러한 경우에 수문 바로 하류부에 공기관 (air vent)을 설치하여 공기를 공급하므로써 피해를 막을 수 있다.

취수시설 (또는 발전시설)에서의 공동현상과 소요공기량에 관련한 연구는 주로 높은 수두에 대하여 연구가 많은 수행되었으며 (Aydin, 2002), 우리나라의 농업용 저수지와 같은 낮은 수두에 대한 연구는 거의 없다.

본 고에서는 우리나라의 설계 기준이 불충분한 취수시설 공기관 설계기법에 대하여 소개하여 앞으로 설계기준의 개정과 관련분야 종사자들에게 참고가 될 수 있도록 하였다.

2. 공동현상

공동현상이란 물속의 압력이 증기압 아래로 내려갈 때 발생한다. 이 때 물 속에 기포가 발생하고 이 기포가 높은 압력구역으로 흘러가면 기포 속의 수증기는 응축하고 기포는 폭발하게 된다. 이 때 폭발로 생긴 공동은 인근에 있던 물이 채우게 된다. 공동현상은 소음발생과 흐름의 방해는 물론이며 가장 중요한 것은 공동현상이 수로벽면에서 발생하면 1,000 기압대의 물입자의 높은 충격이 발생하며 이 현상이 지속되면 콘크리트나 강철 표면에 손상을 초래하고 나아가서는 구조물의 완전한 파손을 초래

할 수 있다. 따라서 설계시에 공동현상으로 인한 소음, 침식 (pitting), 및 진동이 발생하지 않도록 하여야 한다.

고정된 벽면에 유체가 흐를 때 박리점에서 대기압 보다 낮은 압력이 발생하는데 특히 고속 흐름에서는 더 심하다. 즉, 압력과 유속이 공동현상에 영향을 미친다. 무차원 수인 공동 수 (cavitation number)가 한계 값 이하로 내려가면 공동현상이 발생한다.

$$\sigma = 2(p - p_v) / \rho u^2 \quad (1)$$

여기서 σ 는 공동 수, p 는 물 속의 절대압력 (대기압+정수압+원심력에 의한 압력), p_v 는 물 속의 증기압 (대기압과 수온의 함수), ρ 는 유체의 밀도, u 는 유속이다.

일반적으로 공동 수가 0이 되면, 즉 물 속의 절대압력과 증기압이 같게 되면 공동현상이 발생하는 것으로 가정한다. 그러나 물 속의 용존가스나 부유입자가 공동현상의 발생을 촉진시킬 수 있기 때문에 수리설계에서는 절대압력이 수두로 3m 이하로 내려가지 않도록 한다.

그림 1은 관내의 오리피스 또는 수문하류에서의 공동발생을 보여주고 있다. 수문 상류에서는 높은 압력과 느린 유속으로 공동이 발생하지 않는다. 수문 하류에서는 베르누이의 정리에 의하여 유속이

빠르게 되면 압력이 낮아지며 결국 수중의 절대압력이 증기압과 같게 되면 공동이 발생하게 된다. 더 하류로 흘러가면 그림 2A와 같이 유속이 감소하고 압력이 회복되어 공동은 물속 또는 수로 벽면에서 파괴된다. 압력이 더욱 더 감소하면 더 많은 기포가 생기고 이들이 모여서 한 개의 큰 공동을 만들게 되며 그림 1A 보다 더 하류에서 그림 1B와 같이 파괴된다.

수리시설물에 공동현상이 우려되면 이를 저지할 수 있는 안전장치가 필요한데 다음과 같은 방법이 있다.

- ① 공동현상이 감소될 수 있는 수로형상을 만들고, 유입부를 유선형으로 하고, 수로 곡률반경을 크게 한다.
- ② 위험 구역에서 수로 경사를 감소시키든지 단면적을 증가시켜서 유속을 감소시킴으로서 압력을 증가시킨다.
- ③ 저압 구간에 공기관으로 공기를 주입하여 압력을 증가시키고 수중에 기포를 공급하여 공동의 발생을 감소시키고 공동 파괴시에 쿠션 역할을 하게 한다.

취수시설에 설치하는 공기관 (air vent)은 방법 ③에 해당한다.

3. 소요 공기량

3.1 흐름의 분류

Sharma (1976)는 취수터널에 sluice 수문이 설치되어 있는 경우의 7가지 흐름 형태를 소개하였다. 첫 번째는 수문이 닫혀있고 관내에는 공기만 있는 경우로 논의에서 제외한다. 그림 2에서 I-IV 까지는 자유수면을 갖는 흐름이다. 이 때의 소요공기량은 수축단면에서의 Froude 수와 터널 (통관) 길이와 높이 (직경)의 비의 함수라고 하였다. 다섯 번째 흐름은 도수가 발생한 후에 터널이 가득차서 흐

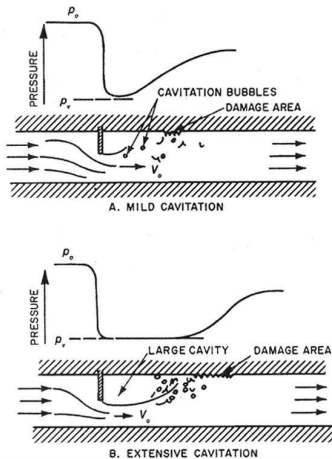


그림 1. 관내의 오리피스 또는 수문하류에서의 공동발생 (after ASHRAE, 1985)

르는 경우이다. 이때의 소요공기량은 아래의 Kalinske and Robertson 식을 사용할 수 있다. 여섯 번째 흐름형태는 관이 만류로 흐르는 경우이며 공기 공급이 불필요하다. 그림 2의 각 흐름을 상세하게 설명하면 다음과 같다.

- I. Spray 흐름 : 수문 개도가 10 % 이하로 작을 때 수문 아래로 분출하는 분류 (jet)가 작은 입자 형태로 분사되면서 많은 량의 공기를 흡입하게 된다.
- II. 자유수면 흐름 : 이 흐름은 공기유량과 물 유량의 비에 의하여 흐름형태가 결정되며 piston 흐름, 파형 흐름 및 층상 흐름이 발생할 수 있다.
- III. Formy 흐름 : 수문 하류부의 터널 내가 거의 균등한 공기와 물의 혼합비를 유지하며 가득차서 흐르지만 압력에 의한 흐름은 아닌 상태이다.
- IV. 수문 하류에서 도수가 발생하며 하류는 자유수면 흐름 상태이다.
- V. 수문 하류에서 도수가 발생하며 하류는 관수로 흐름 상태이다.
- VI. 터널에 물만 흐르는 경우로 잠긴 도수가 발생하는 경우이다.

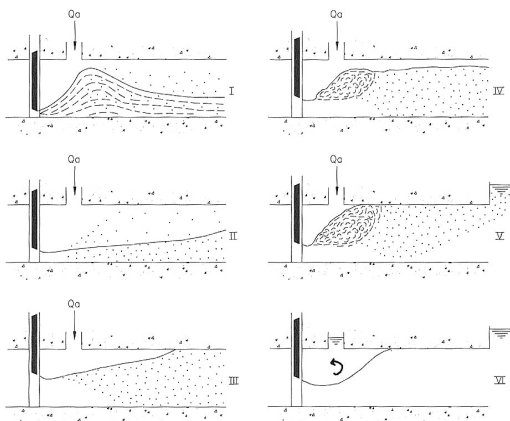


그림 2. 취수터널에 연직 수문이 설치되어 있는 경우의 흐름 형태 (after Sharma, 1976)

3.2 소요 공기량 산정식

취수터널이나 통관의 공동현상에 대처하기 위하여 공기관을 설치하여 공기를 공급한다. 공기관은 숨구멍 역할을 하며 공기를 공급 또는 배제하는 기능을 한다. 공기관은 터널이나 통관의 상류단에 있는 취수문 가까이 하류에 설치한다.

소요 공기량은 공기가 터널 속을 흐르는 물속으로 녹아들어가는 양과 터널 또는 통관 출구에서 수면위로 유출 되는 공기량을 합한 것이다.

미국 육군 공병단은 취수시설에서 흐름상태에 따라서 최대 소요공기량이 다르게 나타난다고 하였다. 도수가 발생하는 경우에는 소요공기량은 한 개의 최대값을 나타내고 자유수면 흐름의 경우에는 두 가지의 수문 개도에서 두 개의 최대값을 나타낸다 (Sharma, 1976).

그림 3은 미국 공병단에서 자유수면 흐름의 경우에 소요공기량 관측을 한 결과를 보여주고 있으며 최대값이 수문 개도에 따라 두 번 나타나는 것으로 밝혀졌다. 즉 수문 개도가 80 % 정도에서와 개도가 아주 작은 때에 최대 소요공기량이 발생하는 것으로 조사되었다.

그림 3의 우측편 그림은 흐름의 형태를 보여주고 있으며 소요공기량의 구성성분을 보여주고 있다. 총 소요공기량은 물속으로 녹아들어가는 연행공기량, 수면 상부의 공간을 통하여 배출구 까지 흘러가

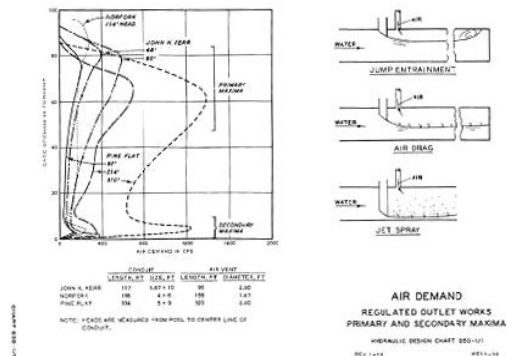


그림 3. 수문 개도에 따른 소요공기량의 변화 (미국 육군공병단, 1987)

는 공기량, 및 공기관 입구부와 출구부의 기온 차와 기압차에 의하여 요구되는 공기량의 합으로 이루어진다. Sharma (1976)에 의하면 수면 상부의 공간을 통하여 배출구까지 흘러가는 공기의 유속은 물의 평균유속보다 큰 것으로 조사되었다.

많은 연구와 실측을 통해서 공동현상을 방지할 수 있는 소요공기량 산정식이 개발되었다. 소요공기량 산정식은 일반적으로 공기유량과 물 유량의 비율 (β)로 나타낸다. 즉,

$$\beta = Q_a/Q_w \quad (2)$$

여기서 Q_a 는 공기유량, Q_w 는 물의 유량이다. 소요공기량은 통관의 형상, 수문의 형상, 수축단면에서의 유속과 수심, 수두 등 여러 가지 매개변수의 함수이다. 지금까지 발표된 소요공기량 산정식의 일반형은 다음과 같다.

$$\beta = K(F-1)^n \quad (3)$$

여기서 F 는 수문 하류 수축단면에서의 Froude 수, K 와 n 은 계수이다.

수축단면에서 Froude 수는 다음 식으로 산정한다.

$$F = \frac{V_c}{\sqrt{gh_c}} = \sqrt{\frac{2gH}{gh_c}} = \sqrt{\frac{2H}{h_c}} \quad (4)$$

여기서 V_c 는 수축단면에서 유속, g 는 중력가속도, h_c 는 수축단면에서 수심, H 는 수축단면에서 유효수두이다.

지금까지 발표된 소요공기량 산정 식들은 다음과 같다.

(1) Kalinske and Robertson (1943)

$$Q_a/Q_w = 0.0066(F-1)^{1.4} \quad (5)$$

이 식은 수문 하류에서 도수가 발생하고 그 하류는 관이 만류로 흐르는 경우인 그림 2의 V형식의 흐름에 대한 실험식이다. 이들은 도수가 발생하는 경우에 소요공기량 비율은 $(F-1)$ 의 함수라는 것을 발견하여 처음으로 위 식을 제시하였다.

(2) Campbell and Guyton (1953)

$$Q_a/Q_w = 0.04(F-1)^{0.85} \quad (6)$$

이 식은 직사각형 수로에서 자유수면을 가지는 흐름에 대하여 개발되었다. 이 식에서 최대 소요공기량이 수문의 개도가 80 %일 때 발생하며, 최대 공기 유속은 45 m/s 이하라야 한다고 하였다. 이 식은 우리나라와 일본의 농업용 저수지 설계기준에서 채택하고 있는 식이다.

(3) 미국 육군 공병단 (1964)

$$Q_a/Q_w = 0.03(F-1)^{1.06} \quad (7)$$

이 식은 하류에서 도수가 발생하지 않을 때 사용하며, 최대 소요공기량이 수문의 개도가 80 %일 때 발생하며 수문 하단부는 45°를 이루며 수축단면의 수축계수는 0.8인 경우에 대한 식이다. Froude 수는 수축단면에서의 값이다. 최대 공기 유속은 45 m/s 이하라야 한다고 하였다. 유속이 커지면 유속의 제곱에 비례하는 각종 손실수두가 증가하게 되어 공기관 내와 출구 부분의 부압이 크게 된다.

(4) Levin (1965)

$$Q_a/Q_w = K(F-1) \quad (8)$$

여기서 K 는 수문형상과 통관의 형상에 따라 결정되는 계수이다.

Levin은 수문형상과 통관의 형상에 따라 여러 가지 K 값을 제시하였다. 그 중 원형 통관에 연직 방향의 수문이 있을 때 K 는 0.025~0.04를 제시하였다.

(5) Sharma (1976)

Sharma는 자유수면 흐름의 경우에 원형에서 관측한 결과 소요공기비는 수문하류의 수축단면에서의 Froude 수와 수문하부 터널의 길이와 터널 직경비의 함수라고 하였으며, 자유수면 흐름에 대하여 다음 식을 제안하였다.

$$\text{도수발생 } (F > 8) : Q_a/Q_w = 0.014(F-1)^{1.4} \quad (9)$$

$$\text{도수발생 } (F < 8) : Q_a/Q_w = 0.04(F-1)^{0.85} \quad (10)$$

Spray 흐름 : $Q_a/Q_w = 0.033(F-1)^{1.4}$ (11)

자유수면 흐름 : $Q_a/Q_w = 0.024(F-1)^{1.4}$ (12)

(6) Haindl (1984)

Haindl은 Kalinske and Robertson 식과 같이 수문 하류에서 도수가 발생하고 그 하류는 관이 만류로 흐르는 경우인 그림 2의 V형식의 흐름에 대한 식을 제시하였다.

$$Q_a/Q_w = 0.024(F-1)^{1.4} \quad (13)$$

(7) 공기량 산정식의 비교

그림 4는 여러 가지 소요공기량 산정 식을 보여 주고 있다. 그림에서 Kalinske and Robertson 식은 도수가 발생하는 그림 2의 V 흐름에 대한 것이고 나머지는 자유수면 흐름에 대한 것이다.

우리나라에서 저수지 설계기준에서 채택하고 있는 Campbell and Guyton 식은 수문 하류의 수축 단면에서의 Froude 수가 5.2 이상이면 미국 공병단 추천 공식보다 작은 소요공기량을 나타낸다. 일반적으로 Levin 식이 가장 큰 소요공기량을 보여주고 있다.

같은 Froude 수에 대하여 자유 흐름 (free surface) 또는 jet spray인 경우의 소요공기량은 도수가 발생하는 경우보다 3배 및 6배의 크다고 하였다 (Sharma, 1976).

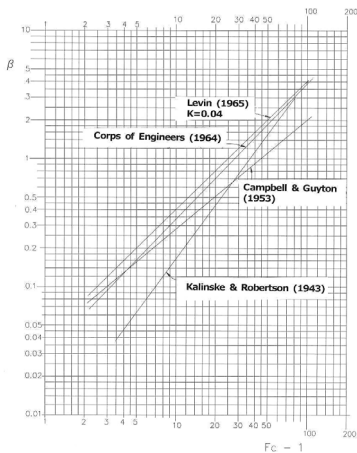


그림 4. 여러 가지 소요 공기량 산정 식 (modified from Erbisti, 2004)

3.3 공기관 규격결정

미국토목학회 (1995)는 개략적으로 수력발전소 압력관 (penstock)에서 공기관 단면적을 압력관 단면적의 0.5 내지 1 %로 한다고 하였다. Novak and Cabelka (1981)는 공기관의 직경이 터널 직경의 1/3~1/5 (단면적은 4~11%) 이며 공기관내의 유속은 50 m/s 이하라야 하며, 일반적으로 45 m/s 이하를 사용한다고 하였다.

소요공기량을 공급할 수 있는 공기관의 정확한 산정방법은 다음과 같다. 공기관내의 유속과 유량은 수문 바로 하류부 공기부분의 부압 H_d 에 의해 결정되며 Mach 수 0.5 이하에서는 공기관 내의 유속 (V_a)과 유량 (Q_a)은 다음 식으로 구한다 (Haindl, 1984; Levin, 1965).

$$V_a = \sqrt{\rho_w/\rho_a} m_a \sqrt{2gH_d} = 28 m_a \sqrt{2gH_d} \quad (14)$$

$$Q_a = V_a S_a = 28 m_a S_a \sqrt{2gH_d} \quad (15)$$

여기서 V_a 는 공기관의 내의 유속, Q_a 는 공기유량, ρ_w 는 물의 밀도, ρ_a 는 공기의 밀도, m_a 는 공기관의 에너지 손실에 따른 유속계수, S_a 는 공기관의 단면적, g 는 중력가속도, H_d 는 수문 직 하류부의 공기 부압 (수두)이다.

ASHRAE (1985) 또는 Levin (1965)에 의하면 유속계수는 다음 식으로 구한다.

$$m_a = \frac{1}{\sqrt{\Sigma C_o + f \frac{L}{d}}} \quad (16)$$

여기서 C_o 는 입구, 출구, 단면변화, 만곡, 스크린 등에 의한 미소 손실계수, f 는 마찰손실계수, L 는 공기관의 길이, d 는 공기관의 직경이다. 손실계수들은 유체역학이나 수리학 교재에 있는 값들을 사용할 수 있으며, 자세한 내용은 ASHRAE(1985)에 있다.

H_d 는 어떤 특정한 한계를 넘으면 안된다. H_d 값이 크면 클수록 공동현상이 생길 가능성이 커진다. Levin (1965)은 잘 설계된 경우에 H_d 값이 수두로

1.5 m까지 허용된다고 하였다. 미국 육군 공병단 (1987)은 유속계수 m_a 가 0.7이고, 공기관내의 최대 유속을 45 m/s로 할 때 H_d 값은 수두로 0.3 m 까지 허용된다고 하였다.

물의 유량 (Q_w)은 다음과 같다.

$$Q_w = B_c h_c \sqrt{2gH} \quad (17)$$

여기서 B_c 는 사각형 수로단면의 경우에 수축단면에서의 수로 폭, h_c 는 수축단면에서의 수심, H 는 수축단면에서의 유효수두이다.

그런데 식 (2)에서 $Q_a = \beta Q_w$ 이므로 식 (15)와 (17)에서

$$28 m_a S_a \sqrt{2gH_d} = \beta B_c h_c \sqrt{2gH} \quad (18)$$

공기관 소요 단면적에 대하여 정리하면

$$S_a = \frac{\beta B_c h_c}{28 m_a} \sqrt{\frac{H}{H_d}} \quad (19)$$

공기관 설계순서는 정리하면 다음과 같다.

- ① 수문의 개도와 수축계수로부터 수축단면에서의 수심 (h_c)를 계산한다.
- ② 수축단면에서의 유효수두 (H)를 구한다 ($H =$ 총수두 - h_c).
- ③ 식 (4)로 Froude 수 (F)를 구한다.
- ④ 식 (5)~(13)중 선정된 식으로 소요공기량을 계산한다.
- ⑤ 공기관의 직경을 가정한다.
- ⑥ 이 직경에 대하여 마찰손실과 미소손실계수를 구하여 식 (16)으로 유속계수 m_a 를 구한다.
- ⑦ 수문 하류부 부압 값 (H_d , 1.0 m)을 선정하고 식 (19)을 이용하여 공기관 소요단면적 (S_a)를 구한다.
- ⑧ 이 단면적에 해당하는 직경을 계산하여 ⑤에서 가정한 값과 비교한다.
- ⑨ 이 두 직경이 같지 않으면 ⑧에서 계산된 직경을 이용하여 ⑥~⑨의 과정을 반복한다.
- ⑩ 식 (15)로 Q_a 를 산정한다.

⑪ Q_a 를 S_a 로 나누어 공기관 내의 평균유속 (V_a)을 계산한다.

⑫ V_a 가 허용 값 (90 m/s) 이내 인지 확인한다. 만약 허용 값 보다 크면 더 큰 직경을 가정하여 ⑥~⑫의 과정을 반복한다.

직사각형 (가로 b , 세로 d) 단면 공기관의 경우에는 다음 식으로 등가 직경을 구하여 사용한다.

$$d_e = 1.3 \left[\frac{(bd)^5}{(b+d)^2} \right]^{1/8} = 1.3 \frac{(bd)^{0.625}}{(b+d)^{0.25}} \quad (20)$$

특히, 정사각형 단면의 경우에는

$$d_e = 1.093b \quad (21)$$

3.4 공기관 설계 예

통관 바닥 기준으로 총수두가 20 m 인 취수시설에서 수문의 폭이 1.5 m 높이가 2.0 m 이다. 공기관으로 강관을 취수탑 콘크리트 속에 설치하며 길이가 19 m 이고, 1개소에 90° 굴절부가 있다. 공기관 입구에는 스크린이 있으며 이는 공기관 단면적의 약 10 %를 차단한다. 이 때 공기관 직경을 구하여라.

<설계 > 소요 공기관 계산은 Erbisti (2004)의 방법을 따랐다.

① 최대 소요 공기량은 수문 개도 80 %에서 발생하며 수축계수는 0.8이다.

수축단면에서의 수심 h_c 는 다음과 같다.

$$h_c = 2.0 \times 0.8 \times 0.8 = 1.28 \text{ m}$$

따라서 유효수두는 $H =$ 총 수두 - $h_c = 20 - 1.28 = 18.72 \text{ m}$

② 식 (4)로 Froude 수를 계산한다.

$$F = \sqrt{\frac{2H}{h_c}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 18.72}{1.28}} = 5.41$$

③ 미 공병단 공식 식 (7)로 소요공기량 비율을 계산한다.

$$Q_a/Q_w = 0.03(F-1)^{1.06} = 0.03(5.41-1)^{1.06} = 0.145$$

④ 공기관의 직경을 0.2 m 로 가정한다.

- ⑤ 이 직경에 대하여 마찰손실과 미소손실계수를 구하여 식 (16)으로 유속계수 m_a 를 구한다. 강관 마찰손실계수 $f = 0.012$, 입구손실계수 0.5, 출구손실계수 1.0, 굴절(90°) 손실계수 1.2, 입구 스크린 (90 % 개방) 손실계수 0.14 : 합계 2.84

$$m_a = \frac{1}{\sqrt{\Sigma C_o + f \frac{L}{d}}} = \frac{1}{\sqrt{2.84 + 0.012 \frac{19}{0.2}}} = 0.50$$

- ⑥ 수문 하류부 부압 값 (H_d , 1.0 m)을 선정하고 식 (19)를 이용하여 공기관 소요단면적 (S_a)를 구한다.

$$S_a = \frac{\beta B_c h_c}{28 m_a} \sqrt{\frac{H}{H_d}} S_o = \frac{0.145 \cdot 1.5 \cdot 1.28}{28 \cdot 0.50} \sqrt{\frac{18.72}{1.0}} = 0.086 m^2$$

- ⑦ 이 단면적에 해당하는 직경을 계산하여 (4)에서 가정한 값과 비교한다.

$$d = \sqrt{\frac{4 S_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.086}{\pi}} = 0.33 m$$

이는 ④에서 가정한 0.2 m와 차이가 크므로 직경을 0.32 m로 수정하여 ⑤~⑦ 과정을 반복한다.

- ⑤* 새로운 유속계수 m_a 를 구한다.

$$m_a = \frac{1}{\sqrt{\Sigma C_o + f \frac{L}{d}}} = \frac{1}{\sqrt{2.84 + 0.012 \frac{19}{0.32}}} = 0.531$$

- ⑥* 식 (19)를 이용하여 공기관 소요단면적 (S_a)를 구한다.

$$S_a = \frac{\beta B_c h_c}{28 m_a} \sqrt{\frac{H}{H_d}} S_o = \frac{0.145 \cdot 1.5 \cdot 1.28}{28 \cdot 0.531} \sqrt{\frac{18.72}{1.0}} = 0.081 m^2$$

- ⑦* 이 단면적에 해당하는 직경을 계산하여 가정한 값과 비교한다.

$$d = \sqrt{\frac{4 S_a}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0.081}{\pi}} = 0.32 m$$

이는 가정한 직경 0.32 m 와 같다.

- ⑧ 식 (15)로 Q_a 를 산정한다.

$$Q_a = V_a S_a = 28 m_a S_o \sqrt{2gH_d} = V_a S_o = 28 \cdot 0.531 \cdot 0.081 \sqrt{2 \cdot 9.8 \cdot 1.0} = 5.3 m^3/s$$

- ⑨ Q_a 를 S_a 로 나누어 공기관 내의 평균유속 (V_a)을 계산한다.

$$V_a = \frac{Q_a}{S_a} = \frac{5.3}{0.081} = 65.4 m/s$$

- ⑩ V_a 가 허용 값 (90 m/s)이내이므로 공기관 직경 0.32 m로 결정한다.

4. 공기관의 설계지침

공기흐름은 비압축성 유체에 대한 수리공식을 사용한다. 다만, 공기 흐름 속도가 60 m/s 이상일 때에는 압축성 유체로 보아야 한다. 미국 공병단의 Engineer Manual (EM) No. 1110-2-1602 Hydraulic Design of Reservoir Outlet Works 에서는 공기관 설계지침을 다음과 같이 제시하고 있다.

- ① 수로 출구로부터 상당히 상류에 위치하는 수문이나 밸브에는 공기관을 설치하여야 한다.
- ② 공기관의 크기는 수문의 개도가 80 %인 때 최대값이 발생한다고 보고 공기의 유속은 45 m/s 이하로 하고 산정한다. 유속이 더 크게 되면 에너지손실이 증가하게 되어 공기관 출구지점의 부압이 증가하게 되어 불리하다. 공기관 내의 흐름은 비압축성 흐름으로 보며, 공기관내 흐름의 에너지 손실은 수두로 0.15 m 내지 0.30 m 이하가 되도록 설계하여야 한다. 고속 흐름이 발생하는 구역에서는 공기의 압축성을 검토하여야 한다.
- ③ 공기관은 에너지 손실과 소음을 줄이기 위하여 만곡이 완만하고 단면변화가 점진적이어야 한다.
- ④ 공기관의 입구는 일반인의 접근을 막아야 하며 철망으로 보호해야 한다. 입구에서 평균유속은 9 m/s 이하라야 한다.
- ⑤ 한 개의 공기관으로 여러 개의 수문에 공기를 공급하는 것은 피한다.
- ⑥ 공기관 출구는 수로의 전 폭에 걸쳐서 공기를 고르게 공급할 수 있는 구조로 설계하여

야 한다.

또한 육군 공병단의 Hydraulic Design Criteria Sheet 050-1 Air Demand 에서는 직사각형 수로의 경우 최대 소요공기량은 수문 개도 80%에서 발생하며 이 때 수축단면에서의 수축계수는 0.8인 것으로 나타나서 결국 전체 수로 단면적의 64%가 수축단면에서의 흐름단면적이 되며 이 때의 Froude 수를 공기량 산정에 이용하여야 한다고 하였다.

한편 원형 단면 수로의 경우에는 원형 단면적의 64%가 물이 흐르는 경우에 최대 소요공기량이 발생하는 것으로 보고 설계하도록 규정하고 있다.

4.1 현재 설계기준

우리나라의 현행 “댐 설계기준”에는 방류관내의 “허용부압수두를 1.5~2.0 m 수주로 잡고 공기관내의 유속을 45 m/s 이하로 하는 것을 기준”으로 한다 (한국수자원학회, 2005)고 간략하게 규정하고 있다.

농업생산기반정비사업 계획설계기준 필뎀편 (농림부, 2002)에는 공기관 설계는 계산에 의하기도 하지만 되도록 모형실험에 의하여 결정하는 것이 바람직하다고 하였다. 또, 공기관의 효과, 공기관 설계시 고려사항, 공기관 크기 결정에 대하여 다음과 같이 규정하고 있다. 설계기준에는 ‘공기구멍’으로 되어 있는데 이는 ‘공기관’이 적절하다고 판단된다.

가. 공기관 설계시 고려사항 (농업생산기반정비사업 계획설계기준)

- 공기관 최소 직경 10 cm 이상.
- 게이트 직하류에 설치하는 공기관 위치는 모형실험으로 정하는 경우 이외에는 게이트 높이 만큼 하류에 정한다.
- 사통의 경우 사통관체 상부에만 설치한 경우

가 많은데, 사통과 취수터널과의 연결부에서 난류로 인한 공동현상을 일으킬 수가 있으므로 이 때에는 이 곳에도 공기관을 설치하여야 한다.

- 취수탑의 경우 소규모 공기관은 탑체 벽에 매설하나 대구경의 것은 탑체벽의 외측에 설치하므로 이 경우에는 지진, 수압, 온도차로 인한 신축 등을 고려한 이음매로 하여야 한다.
- 공기관을 조작실에 개구하면 안 된다.

나. 공기관 직경 결정 (농업생산기반정비사업 계획설계기준)

- 소요공기량 산정은 Campbell and Guyton 식 (3-5)를 사용하는 것을 원칙으로 한다. 단, 소규모 또는 간이적인 것은 계획최대취수량의 15%로 한다.
- 공기관은 구경은 소요공기량을 풍속 45 m/s 를 기준으로 하고, 90 m/s를 초과하지 않는 범위 내에서 정한다.

5. 요약

본 고에서는 댐 (저수지) 취수시설의 공기관 설계기법에 대하여 소개하였다. 현재 매우 불충분하게 되어있는 우리나라 현행 설계기준을 소개하였으며, 예제를 통하여 공기관 직경 계산방법을 소개하였다. 앞으로 설계기준을 개정할 때 참고가 될 수 있을 것이며, 또한 설계자들에게 좋은 참고가 되었으면 하는 바람이다.

감사의 글

본고는 한국농어촌공사 농어촌연구원의 “저수지 취수시설 공기통 설계기준 정립연구” 성과의 일부임. ☺

참고문헌

1. 농림부. 2002. 농업생산기반정비사업 계획설계기준 필담편. 692pp.
2. 한국수자원학회. 2005. 댐설계기준. p.416.
3. 日本 農林水産省 構造改善局. 1993. 土地改良事業計劃設計基準 ダム. 557pp.
4. ASHRAE (American society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers). 1985. ASHRAE Handbook Fundamentals, Chapter 33 Duct design, Appendix B, Fitting loss coefficients. Atlants, USA.
5. ASCE Committee in hydropower intakes of the Energy Division. 1995. Guidelines for design of intakes for hydroelectric plants.
6. Aydin, I. 2002. Air demand behind high head gates during emergency closure. J. of hydraulic research 40(1):83-93.
7. Campbell, F.B. and Guyton, B. 1953. Air demand in gated outlet works, Proceedings of the 5th Congress of the International Association of Hydraulic Research, Minneapolis, Minnesota, 529-533.
8. Haindl, K. 1984. Aeration at hydraulic structures, in Developments in Hydraulic Engineering, Vol 2 (Ed. Novak, P.), Elsevier Applied Science, London, UK. pp.113-158.
9. Erbisti, P.C.F. 2004. Design of hydraulic gates. A.A. Balkema Publishers. The Netherlands. 351pp.
10. Kalinske, A.A. and Robertson, J.W. 1943. Closed conduit flow. Transactions of the American Society of Civil Engineers 108: 1435-1447.
11. Levin, L. 1965. Calcul hydraulique des conduits d'aeration des vidanges de fond et dispositifs deversants, La Houille Blanche, No. 2. pp.121-127.
12. Novak, P. and Cabelka, J. 1981. Models in hydraulic engineering. Pitman Publishing limited. London, UK. 459pp.
13. Sharma, H.R. 1976. Air-entrainment in high head gated conduits, Journal of Hydraulics Division, ASCE, 102(HY11) : 1629-1646.
14. US Department of Army, Office of the Chief of Engineers. 1980. Hydraulic design of reservoir outlet works. Engineer Manual 1110-2-1602. Washington, D.C.
15. US Army Corps of Engineers. 1987. Hydraulic Design Criteria. Sheet 050-1 Air demand-Regulated outlet works.