

사이펀 여수로 공기혼입장치(air slot)의 방류량 조절 능력에 대한 실험 연구

정재상* · 장은철** · 이창훈***

Jung, Jae-Sang*, Jang, Euncheol**, Lee, Changhoon***

Experimental Study for Capability of Air Slot in Siphon Spillway to Control Outflow Discharge

ABSTRACT

In this study, capability of an air slot in a siphon spillway for controlling outflow discharge is investigated through hydraulic experiments. Arc and rectangular shapes of air slot are considered and the open area of air slot can be varied. Complex air-regulated flow occurs inside of the siphon spillway when the air slot is installed on it. The same discharge is measured at the same water level inside the reservoir when the water level rises or falls. Nondimensional discharge through the siphon spillway decreases as nondimensional open area of the air slot increases when head differences and water levels of reservoir are constant. The hydraulic experiments show that the control of outflow discharge of siphon spillway is possible by controlling the open area of the air slot.

Key words : Air slot, Control of outflow discharge, Siphon spillway, Hydraulic experiment

초록

본 연구에서는 수리모형실험을 통해 사이펀 여수로에 장착된 공기혼입장치(air slot)의 방류량 조절 능력을 검토하였다. 공기혼입장치의 단면 형상으로 원호 및 직사각형 형상을 채택하였으며, 개구부 면적을 조절할 수 있게 하였다. 공기혼입장치가 장착된 경우 사이펀 관 내부에 공기와 물이 혼합된 복잡한 흐름이 발생하였다. 공기혼입장치가 장착된 사이펀 여수로에서 저수지 내측 수위가 상승할 때와 하강할 때 동일한 수위에서 동일한 유량이 계속되었다. 공기혼입장치의 무차원 개구부 면적이 증가할수록 일정한 수두차 및 저수지 수위 조건에서 무차원 방류량은 감소하였다. 수리모형실험 결과는 공기혼입장치의 면적 조절을 통해 사이펀을 통한 방류량 조절이 가능함을 보여주었다.

검색어 : 공기혼입장치, 방류량 조절, 사이펀 여수로, 수리모형실험

1. 서론

현재 우리나라에는 약 18,000개의 댐과 저수지가 건설되었으며, 이 중 대부분은 1970년 이전에 건설된 노후화된 필댐이다. 최근 기후변화에 따른 이상기후로 국지성 집중호우 및 돌발홍수가 빈번히 발생하고 있으며, 댐의 설계홍수량의 설계기준이 가능최대홍수량으로 변경됨에 따라 과거 건설된 대부분의 댐 및 저수지들이 현재 설계기준을 만족하지 못하고 있는 실정이다. 이에 노후화된 댐 및 저수지의 치수능력을 증대하고 위한 구조적인 보강대책으로 댐 증고, 보조 여수로 신설, 여수로 확장 및 상류의 홍수 조절용 댐 신설 등의

* 종신회원 · 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원 (Korea Rural Community Corporation · fingon@ekr.or.kr)

** 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임전임연구원 (Korea Rural Community Corporation · jec1004@ekr.or.kr)

*** 종신회원 · 교신저자 · 세종대학교 건설환경공학과 교수 (Corresponding Author · Sejong University · clee@sejong.ac.kr)

Received August 15, 2019/ revised August 22, 2019/ accepted September 10, 2019

방안이 적용되고 있다(Yoon, 2010). 국내에서는 1950년 백곡지에 단면 2×2 m, 낙차 9 m의 사이펀 24기가 국내 최초로 설치된 이후 1994년까지 18개소의 저수지에 사이펀 여수로가 설치된 사례가 있다(Yeo, 1994). 최근에 금전지(2003년 완공), 하동댐(2009년 완공), 미호저수지(2014년 완공) 등 공간이 부족하여 여수로의 확장 및 신설이 어려운 댐이나 저수지에 사이펀 여수로가 설치되었다.

사이펀 여수로는 기존의 월류형 여수로 상부에 설치하여 비교적 경제적으로 댐 및 저수지의 치수능력을 증대시킬 수 있는 장점이 있다. 하지만 사이펀 여수로는 사이펀 관로가 만관(prime)이 되어 방류하기 시작하면 저수지 내측 수위가 사이펀 입구부의 높이보다 낮아질 때까지 멈추지 않고 계속해서 방류하게 된다. 일단 사이펀이 가동되면 저수지 내측 수위에 관계없이 거의 일정한 양의 물이 방류된다. 이와 같은 경우 사이펀의 지속적인 가동에 의해 저수지 하류에 홍수 피해가 발생할 가능성이 크다(Park, 2011). 이에 2014년 설치된 미호저수지에는 사이펀 멈춤장치(air vent)를 사이펀 관로 상부에 설치하고, 사이펀 멈춤장치(air vent)의 입구를 사이펀 입구보다 높게 설치하여 저수지 수위 하강 시 특정 수위에서 사이펀 가동이 멈추도록 하는 방안이 적용되었다. 한편 Ervine(1976)은 공기를 사이펀 내부에 혼입하여 방류량을 조절하는 방안을 최초로 제안하였다. 이후, Babaeyan-Koopae et al.(2002)은 영국 Brent 저수지의 사이펀 여수로를 대상으로 수리모형실험을 통해 사이펀 여수로에 공기혼입장치(air slot)를 설치하여 사이펀 내부에 공기를 혼입함으로써 방류량의 제어가 가능함을 보여주었다. 일반적으로 사이펀 멈춤장치(air vent)는 단지 사이펀 여수로의 가동과 중단만을 제어할 수 있다. 따라서 공기혼입장치를 설치할 경우 사이펀 멈춤장치에 비해 좀 더 정밀하게 방류량을 제어할 수 있는 장점이 있다. 사이펀 멈춤장치(air vent)와 공기혼입장치(air slot)의 형상

은 Fig. 1을 참고할 수 있다. Babaeyan-Koopae et al.(2002)의 연구 이후 몇몇 연구자들에 의해 공기혼입장치가 장착된 사이펀 여수로에서 공기가 혼입된 흐름(air-regulated flow)에 대해 연구를 수행하였다. Houichi et al.(2006; 2009)은 수리모형실험을 통해 타원형의 공기혼입장치가 장착된 사이펀 여수로의 방류량에 대해 연구하였다. 그들은 공기혼입장치의 개구부 전체 면적은 동일하게 하고, slot의 개수를 조절하여 방류량의 변화에 대해 검토하였다. 실험 결과, 공기혼입장치의 개구부 면적이 동일할 때, slot의 개수가 적을수록 저수지 내측 수위 변화에 따라 방류량이 비교적 완만하게 변하는 것을 확인하였다. 반면 Boatwright(2014)는 공기혼입장치가 아닌 사이펀 멈춤장치(air vent)의 면적을 조절하여 사이펀에서 공기가 혼입된 흐름에 대해 연구하였으며, 공기 혼입 흐름이 발생하기 위한 air vent의 최소 면적을 제시하였다.

본 연구의 목적은 유량조절이 가능한 사이펀 여수로를 개발하는데 있다. 전술한 바와 같이 일반적인 사이펀 여수로는 저수지 수위가 하강할 때에도 일정량의 유량을 하류로 방류하기 때문에, 하류측 홍수 피해를 유발할 수 있다. 따라서, 하류측 홍수 피해를 방지하기 위해서는 사이펀 여수로를 통한 방류량 조절이 필요하다. 기존의 연구에서는 사이펀 여수로 하류측 홍수 피해를 방지하기 위해 사이펀 멈춤장치(air vent)를 이용하여 특정 수심에서 사이펀 가동을 멈추거나, 공기혼입장치(air slot)를 이용하여 방류량을 감소시키는 방안에 대해 연구하였다. 하지만, 사이펀 멈춤장치나 공기혼입장치의 개구부 면적 조절을 통해 사이펀의 방류량을 조절할 수 있다면, 저수지의 상·하류측 홍수를 동시에 제어할 수 있어 사이펀 여수로의 홍수조절능력은 더욱 효율적이 될 것이다. 따라서, 본 연구에서는 공기혼입장치(air slot)의 개구부 면적을 조절하여 방류량을 조절하는 기법을 제시하였다. 수리모형실험을 통해 사이펀 여수로에서 공기혼입장치의 개구부 면적 변화에 따른 방류량 변화를 검토하였다. 공기혼입장치의 형상으로 직사각형 및 원호 형상의 2가지 경우를 검토하였다. 저수지 내측 수위 변화에 따른 방류량을 직접 계측하여 제시하였으며, 공기혼입장치의 면적을 조절함으로써 사이펀 방류량 조절 가능성에 대해 검토하였다.

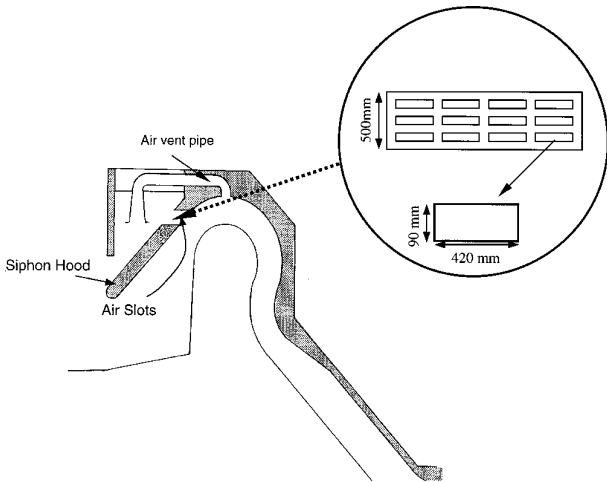


Fig. 1. Example of the Air Vent and the Air Slot in a Siphon Spillway (Babaeyan-Koopae et al., 2002)

2. 수리모형실험 방법

2.1 수리모형의 구성

사이펀 실험을 위한 수리모형은 상류 저수지, 댐, 사이펀 모형 및 하류 측으로 구성되어 제작하였다. 사이펀 관로 내경은 100 mm이고 상류 저수지는 폭 3.0 m, 길이 5.4 m, 높이 1.0 m, 하류하천 부분은 폭 2.1 m, 길이 4.5 m, 높이 0.4 m 규모로 제작하였다. 상류 저수지에는 300 mm 관경의 유량공급배관을 설치하였으며, 유입 관로에는 밸브와 (주)서용엔지니어링에서 제작한 전자기식 유

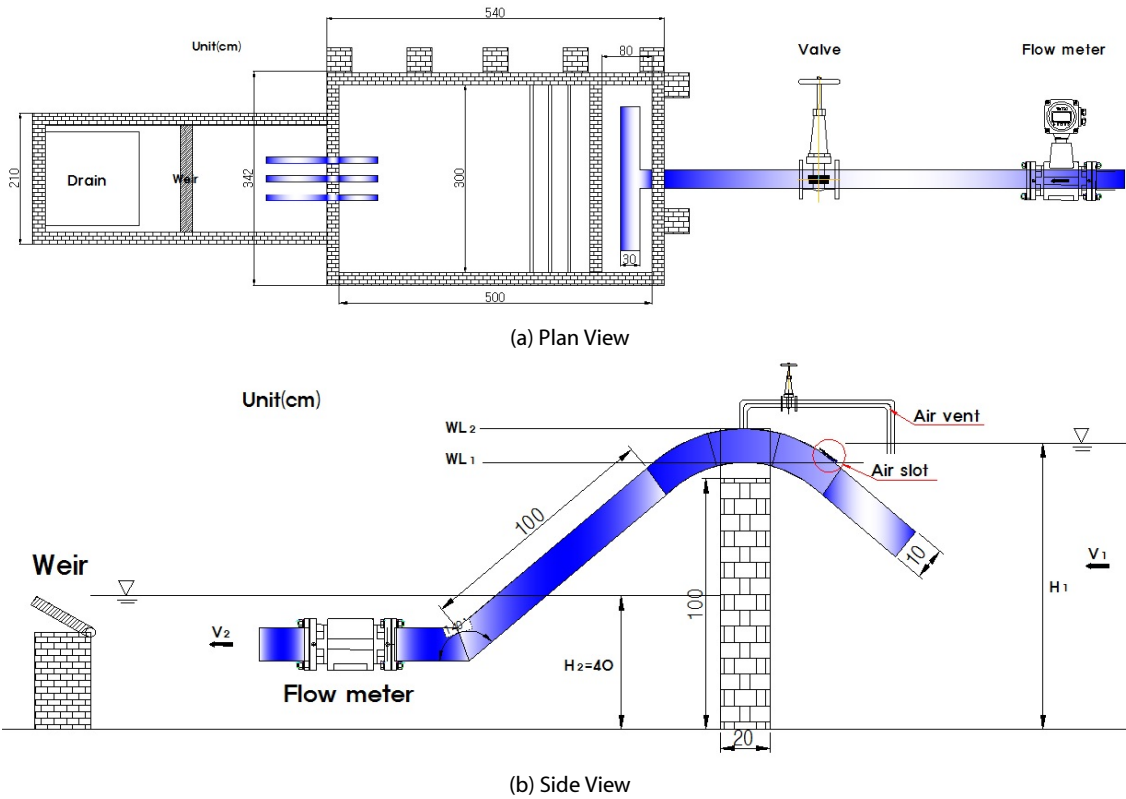


Fig. 2. Definition Sketch of the Model for Hydraulic Experiment

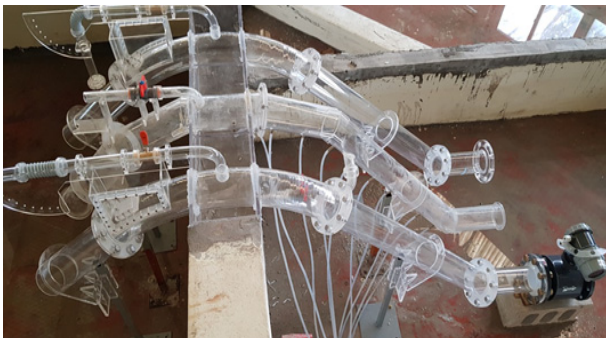


Fig. 3. Siphon Spillways for Hydraulic Experiment

량계(EF-501 00A)를 설치하여 유입유량의 조절 및 계측이 가능하도록 하였다. 본 유량계의 측정 가능 유속 범위는 0.03-12.0 m/s이며, 허용오차는 $\pm 0.5\%$ 이다. 유량계는 한국인정기구(KOLAS)로부터 공인받은 K-Water 연구원에서 검·교정을 수행한 후 사용하였다. 상류 및 하류측 수위 계측을 위해 하류에는 PEPPERL-FUCHS사에서 제작한 초음파 수위계(UC500-30GM-IUR2-V15)와 상류에는 KENEK사의 디지털 포인트게이지(PH-355)를 설치하였다. 초음파 수위계는 측정거리가 360-500 mm이고 분해능이 0.05 mm이며, 디지털 포인트게이지는 측정거리 500 mm, 분해능은 0.01 mm이

다. 상류부 저수지에는 정류판(타공판)을 3열로 설치하여 접근유속을 최소화하고 상류 저수지 내 정온을 유지하였다. 사이펀 모형은 투명 아크릴로 제작하여 내부 흐름을 육안으로 확인할 수 있도록 하였다. 수리모형에 대한 개념도는 Fig. 2와 같으며, 설치된 사이펀 수리모형은 Fig. 3과 같다.

2.2 실험방법 및 조건

수리모형실험은 하류 측에 가동 위어를 설치하여 일정한 수심을 유지하고, 상류 측 공급관로의 밸브를 조절하여 저수지 내측 수위를 조절한 후 정상상태에 도달하였을 때, 상류 측 공급관로에 설치된 유량계를 이용하여 사이펀 통과 유량을 계측하였다. 사이펀 통과 유량은 상류 측 공급관로에 설치된 유량계를 통해 계측한 값의 1분 평균치를 사용하였다. 하류측 수위는 40 cm로 일정하게 고정하였으며, 저수지 수위는 60 cm에서 80 cm까지 수위를 상승시키면서 유량을 계측하고, 80 cm에서 45 cm까지 저수지 수위를 하강시키면서 유량을 다시 계측하였다. 일련의 실험 과정은 공기혼입장치의 형상 및 면적을 변경시키면서 반복 수행되었다.

사이펀에 설치된 공기혼입장치 개구부 면적에 따른 방류량 검토를 위해 공기혼입장치는 Fig. 4와 같이 원호 및 직사각형 형상을 적용하였다. 그리고 공기혼입장치에 문을 설치하여 개구부 면적을

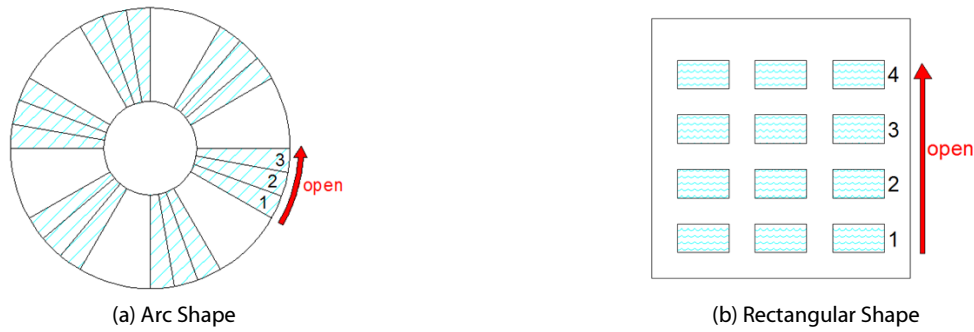


Fig. 4. Shape of Conceptual Air Slots in Hydraulic Experiment

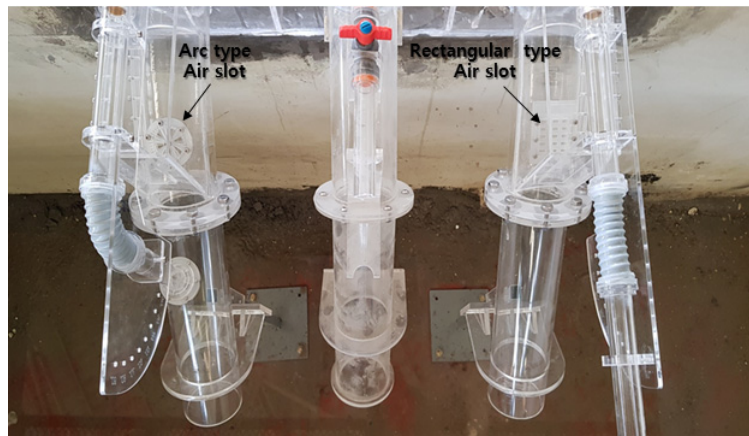


Fig. 5. Shapes of Modelled Air Slots in Hydraulic Experiment

Table 1. Conditions of Open Area of Air Slots in Hydraulic Experiment

Arc shape			Rectangular shape		
Cross-sectional area of siphon (cm ²)		78.5	Cross-sectional area of siphon (cm ²)		78.5
Open area (cm ²)	1 step open	2.052	Open area (cm ²)	1st row open	2.102
	2 step open	4.104		2nd row open	4.204
	Fully open	6.156		3rd row open	6.306
		Fully open		8.408	

조절할 수 있도록 하였다. 사이펀 수리모형에 설치된 공기혼입장치는 Fig. 5와 같다. 사이펀 모형은 Fig. 3과 같이 3련을 설치하였는데, 2개의 사이펀에는 원호형 공기혼입장치 및 사각형 공기혼입장치를 각각 설치하였고, 나머지 하나의 사이펀에는 공기혼입장치를 설치하지 않았다. 수리모형실험은 3개의 사이펀 중 실험조건에 해당하는 하나의 사이펀 여수로만을 가동하여 수행하였다. 수리모형실험에 적용된 공기혼입장치의 개구부 면적 등 실험조건은 Table 1과 같다. Aisenbrey et al.(1978)는 사이펀 흐름을 중단시키기 위한 사이펀 멈춤장치(air vent)의 최소 단면적이 사이펀 관로 단면적의 1/24 (0.042) 이상이어야 함을 제시하였다. 따라서, 본 연구에서는 공기혼입장치에 의해 갑자기 사이펀이 중단되는 것을 막기 위해

공기혼입장치를 구성하는 각 개구부의 면적이 사이펀 관로 단면적의 1/24 이하가 되도록 하였다. 원호 형상의 공기혼입장치 개구부의 면적비는 0.013, 사각형 형상 공기혼입장치 개구부의 면적비는 0.09이다.

3. 사이펀을 통한 방류량 해석에 및 무차원 변수의 유도

3.1 사이펀을 통한 방류량 해석해

사이펀을 통한 방류량은 에너지 방정식을 이용하여 유도할 수 있다. Fig. 2에서 저수지 상류 및 하류의 에너지 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다(Crowe et al., 2002).

$$H_1 + \frac{V_1^2}{2g} = H_2 + \frac{V_2^2}{2g} \left(f_e + f_o + f_{cb} + f \frac{l}{D} \right) \quad (1)$$

여기서, H_1 및 H_2 는 각각 상류 및 하류 수심, V_1 및 V_2 는 각각 상류 접근유속 및 사이펀 유출부 유속, g 는 중력가속도를 나타내며, f_e 는 유입부 손실계수로 본 연구에서는 각이 진 유입부로 보아 0.5를 적용하였으며, f_o 는 유출부 손실계수로 1.0을 적용하였다. f_{cb} 는 곡선부의 손실계수로 Fried and Idelchik(2017)의 연구결과를 참고하여 0.64를 적용하였다. f 는 관로의 마찰손실계수로 0.015를 적용하였으며, 수리모형실험에서 D 는 사이펀의 내경으로 0.1 m 이며, l 은 사이펀 전체 길이로 2.44 m 이다. 본 연구에서 상류 측 접근부 유속(V_1)은 약 0.006 m/s 이내로 그 크기가 매우 작으므로 무시할 수 있다. 따라서, Eq. (1)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$Q = AV_2 = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta H}{F}} \quad (2)$$

여기서, A 는 사이펀의 단면적이고, $\Delta H (= H_1 - H_2)$ 는 상·하류 수위차이고, $F (= f_e + f_o + f_{cb} + fl/D)$ 는 에너지손실계수의 합이다.

3.2 무차원 변수의 유도

수리모형실험 결과의 합리적인 분석을 위해 본 실험을 위한 무차원 변수를 유도하였다. 무차원 변수는 Buckingham의 Π 정리로부터 도출하였다. 사이펀을 통한 유량(Q)에 영향을 미치는 주된 변수로는 상·하류 수위차(ΔH), 공기혼입장치의 면적(a), 사이펀의 내경(D), 중력가속도(g), 물의 밀도(ρ), 점성계수(μ)가 있으며, 이는 Eq. (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = Q(\Delta H, a, D, g, \rho, \mu) \quad (3)$$

여기서, 반복 변수로 사이펀의 내경(D), 중력가속도(g), 물의 밀도(ρ)를 선정한 후 무차원 변수를 유도하면 Eqs. (4)~(7)과 같은 4개의 독립적인 무차원 변수를 유도할 수 있다.

$$\Pi_1 = \frac{Q}{\sqrt{D^5 g}} \quad (4)$$

$$\Pi_2 = \frac{\Delta H}{D} \quad (5)$$

$$\Pi_3 = \frac{a}{D^2} \quad (6)$$

$$\Pi_4 = \frac{\mu}{D^{3/2} g^{1/2} \rho} = \frac{\nu}{D^{3/2} g^{1/2}} \quad (7)$$

위 식에서, Eq. (4)는 무차원화 된 유량이며, Eq. (5)는 무차원화 된 상·하류 수위차, Eq. (6)은 무차원화 된 공기혼입장치의 면적을 뜻한다. 그리고 Eq. (7)은 Reynolds 수를 나타내며, ν 는 동점성계수(kinematic viscosity)를 나타낸다. Eq. (5)와 같이 사이펀의 내경(D)으로 무차원화된 상·하류 수위차를 적용할 경우, 저수지 내 수위가 사이펀 만곡부(천단부)의 어느 높이에 위치하는지 쉽게 알 수 있다(Fig. 2의 측면도에서 WL_1 과 WL_2 사이). 즉, 사이펀을 통한 유량변화가 가장 큰 수위 구간에서 수위-유량 관계를 보다 명확히 파악할 수 있는 장점이 있다. Eq. (4)의 무차원화 된 유량은 Houichi et al.(2006)도 동일하게 적용하였다. 하지만, 본 연구에서는 보다 직관적으로 무차원 변수의 크기를 파악하기 위해 무차원화 된 유량과 무차원화 된 공기혼입장치의 면적을 유량과 유량, 면적과 면적의 비로 다시 정의하였으며, 이는 아래 식과 같다.

$$\Pi_1' = \frac{Q}{\frac{\pi}{4} \sqrt{gD^5}} = \frac{V}{\sqrt{gD}} \quad (8)$$

$$\Pi_3' = \frac{a}{\frac{\pi}{4} D^2} = \frac{a}{A} \quad (9)$$

여기서, Eq. (8)은 무차원화 된 유량으로 Froude 수의 형태를 보이며, Eq. (9)는 사이펀 단면적을 기준으로 무차원화 된 공기혼입장치의 면적이다. 본 연구에서는 Eqs. (8) and (9)를 각각 무차원 유량 및 무차원 공기혼입장치 면적으로 적용하였다. 이상의 무차원 변수 유도를 통해 상·하류 수위차와 공기혼입장치의 면적이 사이펀을 통한 유량에 영향을 주는 주요 변수임을 확인할 수 있다.

4. 수리모형실험 결과

4.1 공기혼입장치가 설치되지 않은 경우

먼저 공기혼입장치가 설치되지 않은 일반적인 사이펀 여수로에 서의 방류량에 대해 수리모형실험을 통해 검토하였다. 공기혼입장치가 없는 일반적인 사이펀 여수로의 방류량은 Fig. 6과 같다. Fig. 6의 수평축인 무차원화된 유량은 Eqs. (2) and (8)을 이용하여 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Pi_1' = \frac{\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g\Delta H}{F}}}{\frac{\pi D^2}{4} \sqrt{gD}} = \sqrt{\frac{2\Delta H}{FD}} \quad (10)$$

여기서, $F(=f_c + f_o + f_{cb} + fl/D)$ 는 에너지손실계수의 합을 뜻하며, 본 실험에서는 $F=2.506$ 이다. 일반적인 사이펀 여수로에서 사이펀의 직경(D)는 상하류 수위차(ΔH)에 비해 매우 작기 때문에($\Delta H/D \gg 1$), 사이펀이 만관이 되어 흐르면 Froude 수 형태의 무차원 유량(Fig. 6의 수평축)도 항상 1보다 크게 된다. 무차원 유량이 1인 경우에 대한 정확한 물리적 의미를 본 연구에서 도출하기는 어렵지만, 사이펀이 만관이 되어 흐르는 경우에는 무차원 유량이 1보다 큰 값을 가진다는 점은 추론할 수 있다. 저수지 수위가 상승하여 사이펀 만관부(천단부)보다 수위가 높아지면, 먼저 일반 위어의 월류 흐름이 나타나며 Fig. 6의 화살표 ①과 같이 유량이 증가한다. 이 구간에서 무차원 유량은 1보다 작다. 이후 저수지 수위가 높아지면서 사이펀 내부의 공기가 배출되고, 만관(prime)이 되면 화살표 ②를 따라 급격히 유량이 증가한다. 이 구간에서 무차원 유량은 1보다 크다. 사이펀이 만관이 되고 난 이후에는 화살표 ③을 따라 유량이 완만히 상승한다. 그리고 사이펀이 한번 가동된 이후에는 저수지 수위가 낮아지면서 화살표 ④를 따라 유량이 완만히 감소한다. 이 구간에서 무차원 유량은 1보다 크다. 즉, 사이펀이 일단 가동되고 나면 저수지 수위가 낮아져도 유량에 큰 변화가 없음을 알 수 있다. 아래 Fig. 6에서 원형 기호는 Eq. (2)의 해석해 결과로, 수리모형 실험 결과와 해석하는 거의 일치하는 결과를 보임을 알 수 있다.

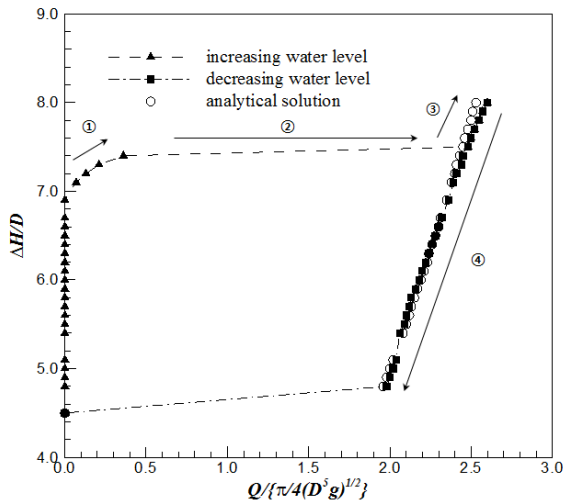


Fig. 6. Nondimensional Discharge Through the Siphon Without Air Slot

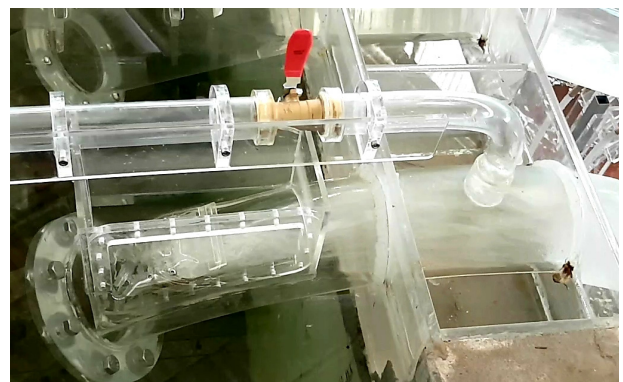
4.2 원호 형상 공기혼입장치의 개구부 면적에 따른 유량

사이펀에 원호(arc shape) 형상의 공기혼입장치가 설치된 경우 무차원 개구부 면적(a/A)에 따른 유량을 계측하였다. 원호형 및 직사각형 공기혼입장치가 설치되어 공기가 연행된 사이펀 관내 흐름 형상은 Fig. 7과 같다. 관 내부로 유입되는 공기방울의 크기가 비교적 작게 형성되어, 공기가 사이펀 관 내부로 유입됨에도 불구하고 사이펀이 계속 가동됨을 Fig. 7에서 확인할 수 있다.

무차원 수두차($\Delta H/D$)에 따른 계측된 무차원 유량($Q/(\pi/4 \sqrt{D^5 g})$)을 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에서 다이아몬드 기호는 a/A 가 0.02613, 역삼각형 기호는 a/A 가 0.05225, 삼각형 기호는 a/A 가 0.07838인 경우의 결과이다. 그리고, 사각형 기호는 공기혼입장치가 없는 경우($a/A=0$) 저수지 수위가 하강할 때의 유량을 나타내며, 원형 기호는 해석해의 결과이다. 공기혼입장치가 없는 경우의 실험결과와 해석하는 거의 일치하는 결과를 보였다. 공기혼입장치를 적용하였을 경우 무차원 수두차가 증가할 때 무차원 유량은 Fig. 6과 같이 급격히 점프하지 않고 연속적으로 증가하였다. 그리고, 무차원 수두차가 하강할 때와 상승할 때 동일한 수두차에서는 거의 동일한 무차원 유량이 계측되었다. 공기혼입장치의 무차원화된 개구부 면적(a/A)이 클수록 동일한 무차원수두차(수위)에서 무차원 유량은 작게 계측되었다. 즉, 공기혼입장치의 무차원화된



(a) Arc Shaped Air Slot



(b) Rectangular Shaped Air Slot

Fig. 7. Air-Regulated Flow Inside the Siphon

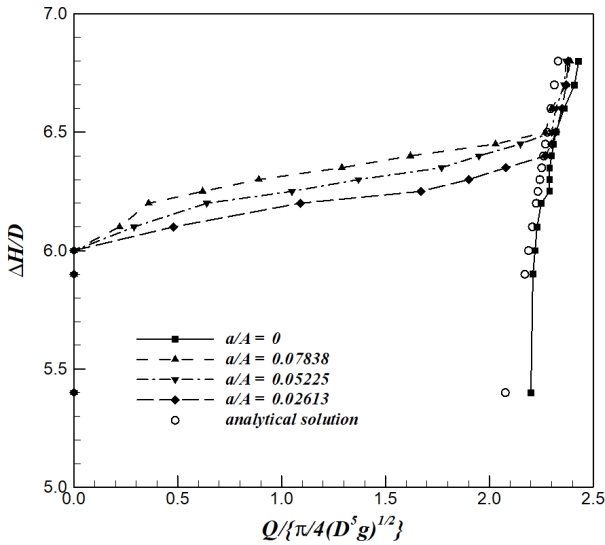


Fig. 8. Nondimensional Discharge Through the Siphon with Arc Shaped Air Slot

개구부 면적이 증가할수록 공기혼입장치를 통한 공기의 혼입량은 증가하고, 이에 의해 방류량은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 사이펀 관로 내부에 유입되는 공기량을 조절함으로써 방류량 조절이 가능함을 보여준다.

4.3 직사각형 공기혼입장치의 개구부 면적에 따른 유량

직사각형 공기혼입장치가 설치된 경우의 수리모형실험 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 실험결과는 원호형 공기혼입장치의 경우와 유사하게 나타났다. 즉, 공기혼입장치가 적용된 경우 무차원 수두차 ($\Delta H/D$)가 증가할 때 무차원 유량($Q/(\pi/4\sqrt{D^5g})$)이 연속적으로 상승하였으며, 저수지 내측의 수위가 하강할 때와 상승할 때 동일한 수두차에서 거의 동일한 유량이 계측되었다. 원호형 공기혼입장치와 마찬가지로 무차원 개구부 면적(a/A)이 클수록 동일한 무차원 수두차에서 유량이 작게 계측되었다. 직사각형 공기혼입장치가 설치된 경우도 공기혼입장치 개구부 면적 조절을 통해 사이펀 관로에 유입되는 공기량을 조절할 경우 사이펀을 통한 방류량 조절이 가능하였다.

무차원 수두차와 무차원 공기혼입장치 면적에 따른 무차원 유량을 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10(a)는 원호형 공기혼입장치를 적용한 경우의 결과이며, Fig. 10(b)는 직사각형 공기혼입장치를 적용한 경우의 결과이다. 두 결과는 큰 차이가 없이 거의 유사함을 그림에서 확인할 수 있다. Fig. 10에서 사이펀 만곡부(천단부)의 높이인 무차원 수두차($\Delta H/D$)가 6.0에서 유량이 상승하기 시작한다. 그리고, 사이펀 직경의 50% 수준인 무차원 수두차($\Delta H/D$)가 6.5 이상에서 방류량은 최대가 된다. 무차원 수두차($\Delta H/D$)가 6.0과 6.5 사이의 높이에 공기혼입장치가 설치되어 있기 때문에

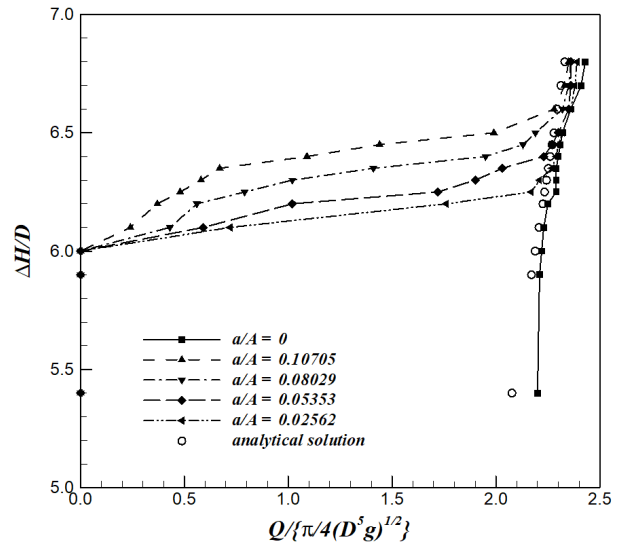


Fig. 9. Nondimensional Discharge Through the Siphon with Rectangular Shaped Air Slot

이 구간에서 방류량의 변화가 발생하였다. Fig. 10을 통해 보면 공기혼입장치의 형상보다는 무차원 공기혼입장치의 면적(a/A)과 무차원 수두차($\Delta H/D$)가 무차원 유량($Q/(\pi/4\sqrt{D^5g})$)에 더 큰 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 특히, 무차원 공기혼입장치 개구부 면적이 증가할수록 동일한 무차원 수두차(수위)에서 유량은 감소하였다.

일련의 수리모형실험을 통해 사이펀 여수로에 공기혼입장치를 설치할 경우 사이펀을 통한 유량은 무차원 수두차에 따라 연속적으로 변하고, 수위가 하강할 때와 상승할 때 동일한 수위-유량 곡선을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 무차원 공기혼입장치의 면적이 감소하고, 무차원 수두차가 증가할수록 무차원 유량은 증가하였다.

4.4 공기혼입장치 형상에 따른 유량

원호 및 직사각형 공기혼입장치가 설치된 경우의 사이펀 방류량에 대해 정량적으로 비교·검토하였다. 원호 및 직사각형 공기혼입장치가 설치된 사이펀 방류량의 상대 백분율 차이(relative percent difference)를 다음 식과 같이 정의하였다.

$$E_r = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{|(Q_r)_n - (Q_a)_n|}{(Q_r)_n} \times 100 \quad (11)$$

여기서, E_r 은 원호 및 직사각형 공기혼입장치가 설치된 사이펀 방류량의 상대 백분율 차이를 나타낸다. 그리고, Q_a 는 원호형 공기혼입장치가 설치된 사이펀의 방류량, Q_r 은 직사각형 공기혼입장치가 설치된 사이펀의 방류량을 뜻한다. Fig. 10에 나타난 일련의

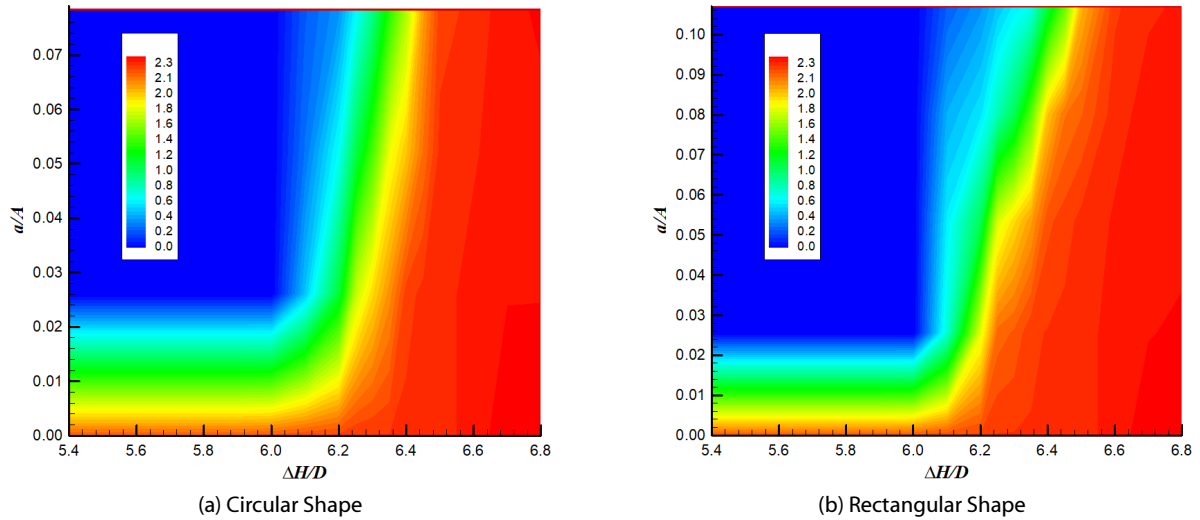


Fig. 10. Variation of Nondimensional Discharge ($Q/(\pi/4\sqrt{D^5g})$) Through Siphon with Both Nondimensional Water Level Difference and Air Slot Area

실험 결과들을 이용하여 공기혼입장치 형상에 따른 방류량의 상대 백분율 차이를 계산한 결과 14.65%로 나타났으며, 공기혼입장치가 직사각형 형상인 경우 원호 형상과 동일한 공기혼입장치 면적에서 방류량이 더욱 크게 나타났다. 이는 직사각형 형상의 공기혼입장치 개구부 면적을 조절할 때, Fig. 4(b)와 같이 이태쪽 공기혼입장치부터 위쪽으로 공기혼입장치를 개방하는 방식을 취했기 때문인 것으로 판단된다. 저수지 수위가 사각형 형상 공기혼입장치 개구부보다 높아질 경우 사이펀 내부로 공기가 거의 유입되지 않기 때문에 사이펀을 통한 유량은 원호 형상보다 크게 나타난다. 이는 Fig. 10(b)에서도 확인할 수 있는데, 방류량 contour가 사각형 형상 공기혼입장치 각 개구부 위치에서 유량이 크게 상승하여 계단 형상이 나타남을 볼 수 있다. 반면 원호 형상의 공기혼입장치는 Fig. 4(a)와 같이 회전하면서 면적을 조절하기 때문에, 항상 공기혼입장치의 개구부가 위치하는 공간적 범위가 일정하다. 따라서, 저수지 수위의 변화에 크게 상관없이 공기가 사이펀 내부로 유입되기 때문에 사각형 형상 공기혼입장치가 장착된 사이펀 여수로에 비해 방류량이 작게 나타났다.

5. 공기혼입장치 면적조절을 통한 유량 조절 능력 검토

본 절에서는 사이펀 여수로에 장착된 공기혼입장치의 개구부 면적조절을 통한 유량조절 능력에 대해 검토하였다. 개구부 면적에 따른 사이펀 여수로의 방류량은 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11은 특히 동일한 수두차에서 공기혼입장치의 개구부 면적에 따라 방류량이 어떻게 변화하는지를 보여준다. 검토를 위한 저수지의 무차원 상하류 수위차($\Delta H/D$)의 범위는 사이펀 여수로 천단부 하단의

높이(h_1 , Fig. 2 참고)와 상단 높이(h_2) 사이인 6.0~7.0 구간으로 설정하였다. 이는 이 범위에서 공기혼입장치 면적조절을 통한 방류량 조절이 가능하기 때문이다. Fig. 11(a)는 원호형 공기혼입장치를 장착한 사이펀 여수로의 방류량을 나타내며, Fig. 11(b)는 사각형 형상 공기혼입장치를 장착한 사이펀 여수로의 방류량을 나타낸다. Fig. 11을 통해서 무차원 공기혼입장치 면적이 증가할수록 동일한 수두차에서 유량이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 저수지의 상하류 수위차가 6.1일 때, 공기혼입장치를 장착한 경우 무차원 유량이 0.5 이하로 낮게 나타났다. 저수지의 상하류 수위차가 6.3인 경우에는 공기혼입장치의 면적 변화에 따라 무차원 유량 역시 크게 변하는 것으로 나타났다. 반면 저수지의 상하류 수위차가 6.8인 경우에는 저수지 상류측 수위가 사이펀 여수로 천단부 상단 높이에 육박하여, 공기혼입장치 면적에 관계 없이 거의 일정한 유량을 보였다.

공기혼입장치의 면적조절을 통한 유량조절 능력은 Fig. 11에서 동일한 공기혼입장치의 면적에서 유량의 분포를 통해 확인할 수 있다. Fig. 11에서 무차원 공기혼입장치의 면적이 0인 경우에는 무차원 유량 분포가 2.2~2.5에 집중되어 있다. 원호형 공기혼입장치에서 무차원 공기혼입장치의 면적이 0.07837인 경우 무차원 유량은 0.2~2.5 사이에 넓게 분포한다. 직사각형 공기혼입장치에서도 무차원 공기혼입장치의 면적이 0.10705인 경우 무차원 유량은 0.2~2.5 사이에 넓게 분포한다. 즉, 저수지 상류의 수위 하강 시 사이펀을 통한 방류량을 빠르게 감소시키기 위해서는 무차원 공기혼입장치의 개구부 면적을 비교적 크게 할 필요가 있고, 방류량을 천천히 감소시키기 위해서는 무차원 공기혼입장치 개구부 면적을 비교적 작게 유지시킬 필요가 있음을 알 수 있다.

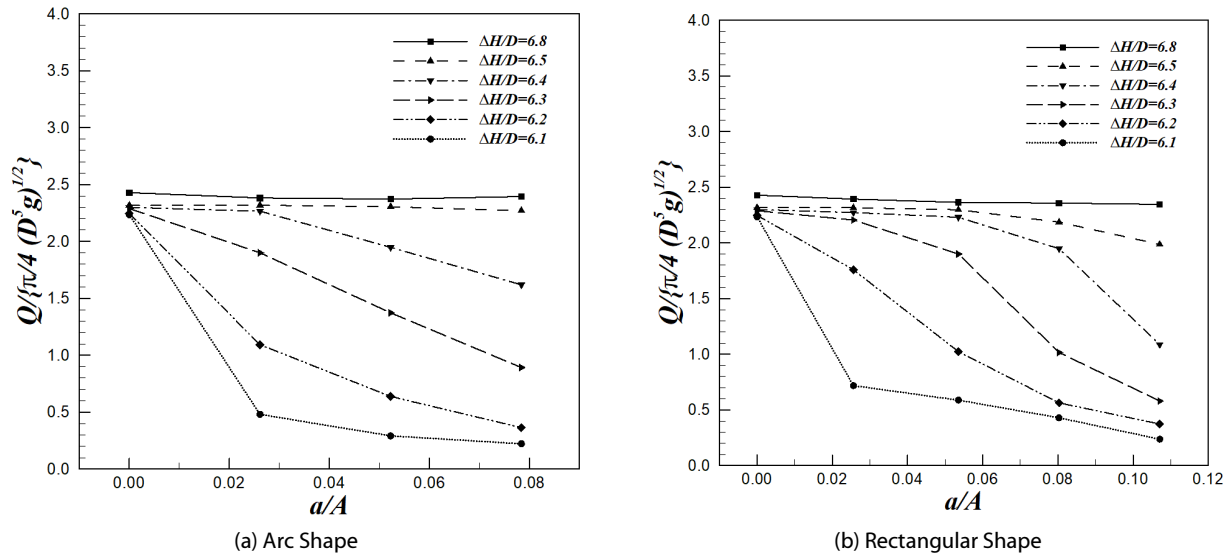


Fig. 11. Nondimensional Discharge ($Q/(\pi/4\sqrt{D^5g})$) Through Siphon as Varying Nondimensional area of Air Slot

6. 결론

본 연구에서는 일련의 수리모형실험을 통해 공기혼입장치가 장착된 사이펀 여수로의 방류량을 검토하였다. 공기혼입장치의 형상은 원호형과 사각형상을 적용하였다. 그리고, Buckingham의 Π 정리를 이용하여 4개의 무차원 변수(무차원 유량, 무차원 공기혼입장치 개구부 면적, 무차원 상하류 수위차, Reynolds 수)를 유도하였으며, 이를 이용하여 수리모형실험 결과를 정리하였다. Babaeyan-Koopae et al.(2002)은 공기혼입장치가 적용된 사이펀 여수로의 방류량에 대해 수리모형실험을 통해 검토하였으나, 공기혼입장치의 면적 변화는 고려하지 않았다. 본 연구에서는 Babaeyan-Koopae et al.이 수행한 연구에서 공기혼입장치의 면적 변화를 통한 사이펀 방류량제어에 대해 추가로 검토하였다. Babaeyan-Koopae et al.의 연구에서는 사이펀 여수로에 대해 하나의 수위-유량곡선을 제시하였는데, 본 연구에서는 공기혼입장치 면적에 따라 다양한 수위-유량 곡선을 도출하였다.

실험 결과, 공기혼입장치를 적용한 경우 무차원 수위차($\Delta H/D$)가 상승할 때와 하강할 때 동일한 수위-유량 곡선이 산출되었다. 즉, 기존의 일반 사이펀 여수로와는 달리 수위가 하강할 때에도 사이펀 입구부보다 수위가 낮지 않으면, 계속 사이펀이 가동되는 현상을 방지할 수 있음이 확인되었다. 무차원 공기혼입장치 개구부 면적(a/A)이 증가할수록 동일한 무차원 수위차($\Delta H/D$) 및 수위 조건에서 무차원 유량($Q/(\pi/4\sqrt{D^5g})$)은 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 공기혼입장치 개구부 면적 조절을 통해 사이펀 내부로 혼입되는 공기량을 조절할 수 있고, 이를 통해 사이펀 여수로를 통한 방류량 제어가 가능하였다. 공기혼입장치의 형상에 따른 유량 검토 결과 원호형 및 직사각형 형상 공기혼입장치의 유량 상대

백분율 차이는 14.65 %로 나타났다. 즉, 공기혼입장치 형상에 따른 유량 차이는 개구부 면적에 따른 유량 차이에 비해서 작은 것으로 검토되었다. 이상의 결과를 통해 사이펀에 공기혼입장치를 설치하고 개구부 면적을 조절하면, 사이펀 여수로의 수위가 하강할 경우 사이펀 방류량을 조절할 수 있어 저수지 상류나 하류측의 홍수 제어를 동시에 할 수 있는 세밀한 방류량 조절이 가능함을 알 수 있다.

본 연구에서는 동일한 사이펀 내경에 대해서만 수리모형실험을 수행하였다. 그리고, 공기혼입장치를 구성하는 slot 하나의 면적 변화에 따른 유량변화에 대해서는 검토하지 않았다. 따라서, 보다 일반화된 연구 결과를 도출하기 위해서 향후 다양한 사이펀 내경 및 공기혼입장치 slot 하나의 면적 변화에 따른 유량에 대해서도 본 연구와 동일한 방식의 실험이 수행될 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(17CTAP-C115126-02)에 의해 수행되었다.

References

- Aisenbrey, A. J., Hayes, R. B., Warren, H. J., Winsett, D. L. and Young R. B. (1978). *Design of small canal structures*, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado. USA.
- Babaeyan-Koopae, K., Valentine, E. M. and Ervine, D. A. (2002). "Case study on hydraulic performance of Brent Reservoir siphon spillway." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 128, No. 6, pp. 562-567.

- Boatwright, J. D. (2014). *Air-regulated siphon spillway: Performance, modeling, design, and construction*, MS thesis, Clemson University, Clemson, South Carolina, USA.
- Crowe, C. T., Elger, D. F. and Roberson, J. A. (2002). *Engineering fluid mechanics*, 7th Edition, Wiley, USA.
- Ervine, D. A. (1976). "The design and modelling of air-regulated siphon spillways." *Proc. Inst. Civ. Eng.*, Part 2, Vol. 61, pp. 383-400.
- Freid, E. and Idelchik, I. E. (2017). *Flow resistance: a design guide for engineers*, Taylor & Francis, New York, USA.
- Houich, L., Ibrahim, G. and Achour, B. (2009). "Experimental comparative study of siphon spillway and over-flow spillway." *Courrier du Savoir*, Vol. 9, pp. 95-100.
- Houichi, L., Ibrahim, G. and Achour, B. (2006). "Experiments for the discharge capacity of the siphon spillway having the creager-ofitserov profile." *International Journal of Fluid Mechanics Research*, Vol. 33, No. 5, pp. 395-406.
- Park, H. C. (2011). "Prevention methods for disaster of downstream and dam using siphon spillway." *Water for Future*, KWRA, Vol. 44, No. 1, pp. 63-66 (in Korean).
- Yeo, W. C. (1994). *Examples of design and construction of siphon spillway*, Korea Institute of Agricultural Land Development (in Korean).
- Yoon, D. K. (2010). "Investigation of the methods for increasing flood control capacity of reservoir." *Journal of Korean National Committee on Irrigation and Drainage*, pp. 37-42 (in Korean).