

저수지 취수시설의 공기관을 통한 공기연행에 대한 실험적 연구

강민구* · 박영진** · 김지성***

Kang, Min Goo*, Park, Young Jin**, Kim, Ji Seong***

Experimental Investigations on Air Entrainment Through an Air Vent Installed on a Gated Conduit of a Reservoir

ABSTRACT : In this study, factors that affect the air entrainment within a closed conduit by air drawn in through an air vent are investigated using a hydraulic scale model, which represents a gated circular conduit system connected to the intake tower of an irrigation reservoir. In addition, using data obtained during the hydraulic experiments, experimental equations are developed to estimate the amount of air drawn in through the air vent. In case of pressurized flow conditions downstream of hydraulic jumps, the relationships between $\frac{Q_a}{Q_w}$ and $Fr_g - 1$ of the data form an experimental equation, $\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0304(Fr_g - 1)^{1.0622}$; in case of free surface flow conditions, $\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0271(Fr_g - 1)^{1.8205}$. Comparing two data sets observed under the two flow regimes with the results of previous researchers, patterns of the data sets are similar to the results estimated using the equations presented previously, and this indicates that the quality of the data obtained during the hydraulic experiments is ensured. In addition, it is revealed that air entrainment phenomena in the regions close to air vents are affected by the characteristics of supercritical flows downstream of gates. Finally, it is concluded that the equation developed for pressurized flow conditions can be applied to design of air vents.

Key words : air entrainment, air vent, hydraulic jump, hydraulic experiment, gated conduits of reservoirs

초 록 : 본 연구에서는 저수지 취수탑에 연결된 방류관의 게이트 직하류에서 발생하는 공기연행현상에 영향을 미치는 인자들을 수리 모형실험을 통해서 파악하였다. 또한 측정자료의 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 관계를 이용하여 공기관의 연행공기량 추정식을 개발하였다. 측정된 자료는 게이트 하류 흐름에 따라 구분되었으며, 개발된 실험식은 만관 흐름인 경우에 $\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0304(Fr_g - 1)^{1.0622}$, 자유수면 흐름인 경우에 $\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0271(Fr_g - 1)^{1.8205}$ 이었다. 측정 자료와 기존 연구결과들의 비교를 통해서 측정 자료가 기존 실험식의 추정 결과와 유사한 분포를 나타내고 측정 자료의 신뢰성이 확보된 것으로 파악되었다. 또한 공기관 부근에서 발생하는 공기연행현상은 게이트 하류에서 발생하는 사류 특성으로부터 영향을 받는 것으로 나타났다. 최종적으로 하류 만관 흐름 조건에 대한 실험식은 공기관 설계에 적용이 가능한 것으로 사료된다.

검색어 : 공기연행, 공기관, 도수, 수리실험, 저수지 취수시설

* 정희원 · 미래자원연구원 연구위원 (Corresponding Author · Future Resources Institute · kmg1218@gmail.com)

** 정희원 · 한국농어촌공사 감사실 (water87@ekr.or.kr)

*** 한국농어촌공사 농어촌연구원 주임연구원 (intell97@ekr.or.kr)

Received June 5 2012, Revised October 16 2012, Accepted November 18 2012

1. 서론

저수지 취수시설의 게이트를 개방하면 하류에서는 개도율에 따라 상이한 흐름이 발생하며, 이는 Fig. 1과 같이 만관 흐름과 자유수면 흐름으로 대별된다. 만관 흐름은 게이트 부근에서 발생한 도수로 인하여 하류관이 급속하게 채워짐에 따라 형성되며, 자유수면 흐름은 게이트 개도율이 작아 유량이 작은 경우에 도수 후에 하류관을 완전히 채우지 못하여 형성된다. 특히 만관 흐름이 발생한 경우에는 게이트 직하류에서 부압이 발생할 수 있으며, 이로 인하여 공동현상이 발생할 가능성이 높다. 공동현상을 방지하기 위하여 댐이나 저수지의 취수시설에는 일반적으로 공기관을 설치하여 공기를 주입하며, 이를 통하여 부압 발생을 방지하고, 수중에 기포를 공급하여 관벽에서 쿠션 역할을 하게 한다(Jeong and Yoon, 2005).

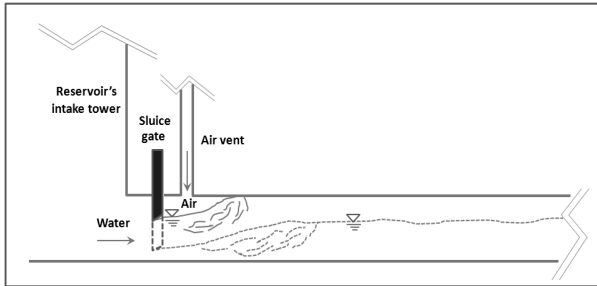


Fig. 1. Air Entrainment Phenomenon Resulting from Hydraulic Jumps and Air drawn in Through an Air Vent

국내에서는 댐설계기준(Korea Water Resources Association, 2005)과 농업생산기반정비사업 계획설계기준(Ministry of Agriculture, 2002)에 방류관의 공기관 설계를 위한 기준들이 제시되어 있다. 댐설계기준에는 방류관 내의 허용부압수두를 1.5~2.0 m로 제한하고 있으며, 공기관 내의 유속을 45 m/s이하로 제한하고 있다. 특히 농업생산기반정비사업 계획설계기준에는 모형실험을 통해서 공기관을 설계하는 것이 바람직한 것으로 제시되어 있다. 따라서 영향 인자들로 구성된 연행공기량 추정식을 적용하여 효과적으로 공기관을 설계해야 한다. 이를 위해서는 수리실험을 통하여 공기관 부근에서 발생하는 공기연행 현상에 대한 영향 인자들을 수리모형실험을 통하여 파악하고, 대상 취수시설에 적합한 연행공기량 추정식을 개발할 필요가 있다.

취수문 개방이나 관 내 오리피스스의 하류관에서 발생하는 도수현상으로 인해 연행되는 공기량을 추정하기 위한 연구들은 Table 1과 같이 Kalinske and Robertson(1943)의 연구 이후 최근까지 수행되고 있다. Campbell and Guyton(1953)은 사각형 수로의 자유수면 흐름에 대한 연행공기량 추정식을 개발한 바가 있으며, Sharma(1976)은 고수위의 사각형 관로에서 게이트 개방에 따라 하류에서 발생하는 흐름 현상을 6가지로 구분하고 각각에 대하여 연행공기량 추정식을 제안한 바가 있다. 최근의 연구들에서는 연행공기량에 영향을 미치는 인자들을 수리모형실험을 통하여 파악하는 것에 초점을 맞추고 있다. Escarameia (2007)는 원형관로에서 도수로 인한 연행공기량을 측정하고

Table 1. Comparison of Equations Previously Presented

Researchers	Equations	Experimental conditions
Kalinske and Robertson(1943)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0066(F_r - 1)^{1.4}$	Pressurized flow; circular conduit; hydraulic jumps
Campbell and Guyton(1953)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.04(F_r - 1)^{0.85}$	Free surface flow; rectangular conduit
US ACE(1964)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.03(F_r - 1)^{1.06}$	Free surface flow
Rajaratnam(1967)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.018(F_r - 1)^{1.245}$	Rectangular conduit; hydraulic jumps
Wisner et al.(1975)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.014(F_r - 1)^{1.4}$	Rectangular conduit; hydraulic jumps
Sharma(1976)	$\frac{Q_a}{Q_w} = f(F_{1c}, \frac{A_c}{A_t})$	Rectangular conduit; 6 flow conditions
Rabben et al.(1983)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.03(F_r - 1)^{0.76}$	Rectangular conduit; hydraulic jumps
Escarameia(2007)	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0025(F_r - 1)^{1.8}$	Pressurized flow; circular conduit; hydraulic jumps

Q_a : Amount of air drawn in through an air vent; Q_w : Discharge of released water from a gate; F_r : Froude number upstream of a hydraulic jump; F_{1c} : Froude number at a contracted section; $\frac{A_c}{A_t}$: Area ratio of contracted section to total cross section of a conduit

영향인자들과 관계를 고려하여 개발한 추정식을 다른 연구자들의 연구결과와 비교한 바가 있으며, 수리모형에 사용된 수로의 기하학적 특성, 하류 흐름 특성, 출구 조건 등이 연행공기량에 영향을 미친다고 보고하였다. Mortensena(2009)와 Mortensena et al.(2011)은 관로에서 도수로 인해 발생하는 공기연행 현상에 대한 관로의 크기 및 유체 성질의 영향을 분석하기 위하여 수리모형실험을 수행하였으며, 관로의 크기가 공기연행에 미치는 영향은 미미하며, 수온이 미치는 영향이 크다고 보고하였다. 위와 같은 연구결과들과 같이 공기관을 통해 유입된 공기량이 시설물의 특성 및 흐름 조건으로부터 영향을 받기 때문에 이들을 반영하여 연행공기량 산정식을 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 저수지의 취수탑에 연결된 방류관에 설치된 공기관 부근에서 발생하는 공기연행현상을 수리모형을 통하여 재현하고 영향인자를 파악하였다. 실험결과의 정확성을 평가하기 위하여 기존 연구들에서 제안된 추정식들의 추정 결과와 실험결과를 비교하였으며, 하류 흐름조건에 따른 공기관의 연행 공기량 추정식을 개발하였다. 기존 연구들에 의해 제안된 추정식들과 개발된 추정식의 추정 결과를 비교하였으며, 공기관 설계에 대한 적용성을 고찰하였다.

2. 수리모형 실험

2.1 수리모형의 구성

수리모형은 경상북도 영천시 화산면 당치리에 위치한 당지저수지의 취수탑과 방류관을 Froude 상사법칙을 적용하여 1:3.5의 비율로 축소 제작한 것이다. 공기관 주변에서 공기연행 현상이 발생할 때에는 공기관 주변에서 자유수면 흐름이 발생하며, 이곳의 흐름 특성이 방류관 흐름에 지배적인 영향을 미치기 때문에 Froude 상사법칙을 적용하였다. Fig. 2는 수리모형의 구성을 개략적으로 나타낸 것이며, 유입유량 조절부, 수조, 방류관로 등으로 구성된다. 수조는 저수지의 취수탑을 모형화한 것이며, 수조 내 용수는 저수조로부터 가압펌프를 사용하여 공급된다. 수조의 직경은 2,000 mm이며, 수조의 수두를 측정하기 위하여 액주계를 설치하였다. 저수조에서 수조까지는 고압력을 견딜 수 있도록 주철 재질의 관로를 사용하였다. 수조에 부착된 방류관은 총 15.3 m이며, 직경은 200 mm이다. 게이트 부근에서 발생하는 관 내 수리현상을 관찰하기 위하여 수조로부터 하류로 2.4 m까지는 아크릴 재질의 관로를 사용하였으며, 그 이하는 PVC관을 사용하였다. 수조로부터 방류량은 방류관에 설치된 전동 조절 밸브를 사용하여 Sluice Gate의 개도율을

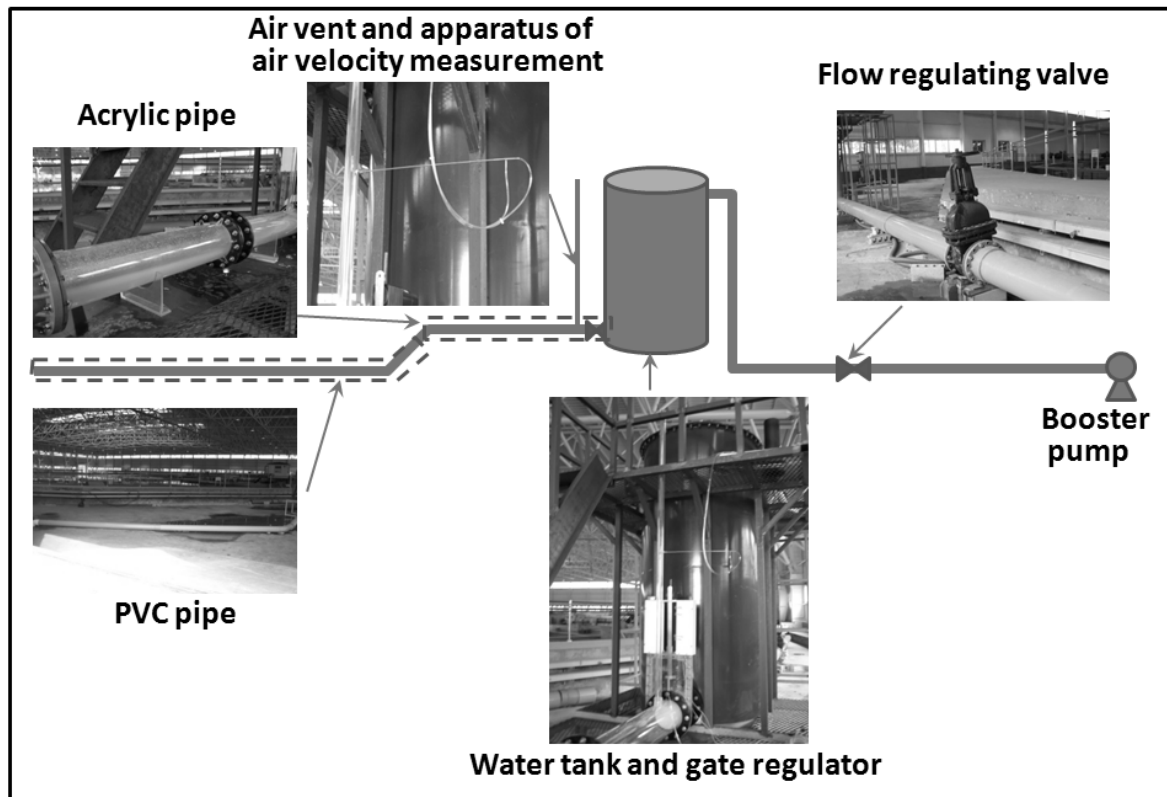


Fig. 2. Schematic Diagram of Hydraulic Experiment Facility

Table 2. Experimental Conditions Categorized by Flow Conditions Downstream of Hydraulic Jumps

Flow conditions	Number of experiments	Opening ratios of gate (%)	Amounts of inflow (m ³ /h)	Pressure heads of water tank (m)	Flow velocities at contracted section (m/s)	Air velocities in air vent (m/s)	Froude numbers
Pressurized flow	16	70~88	390.2~324.5	1.22~2.35	3.27~5.12	5.60~22.12	2.3~4.7
Free surface flow	22	30~77	111.0~372.0	1.37~2.35	3.26~5.21	12.27~61.85	3.3~7.3

조정하여 조절하였다. 실험조건별로 개도율을 산정하기 위하여 측정자를 이용하여 게이트 상승 높이를 측정하고 이에 따른 개도면적과 개도율을 게이트 특성곡선을 이용하여 환산하였다. 방류관으로 유량이 공급될 때 외부로부터 공기가 유입되도록 하기 위하여 게이트 직하류에 투명 이크릴 재질인 직경 30 mm의 공기관을 설치하였다.

2.2 실험 방법

게이트 개방 이후 관 내 유속과 수위를 측정하기 위하여 Pitot관을 관 내에 삽입하여 관 내 수심이 형성된 흐름의 압력과 대기압의 차이를 측정하였으며, 흐름의 수위는 스탠딩 자를 사용하여 육안으로 측정하였다. 측정위치는 게이트 직하류이며, 측정되는 수위에 따라 Pitot관의 위치를 조정하였다. 자료 처리 장치를 이용하여 Pitot관에 의해 측정되는 값을 수치로 나타냈으며, 이를 유속으로 환산하였다. 유속측정 지점의 수위는 스탠딩 자를 이용하여 3회 이상 반복 측정하여 평균값을 사용하여 결정하였으며, 이를 수심으로 환산하였다.

공기관은 Fig. 2에 제시된 공기관 및 공기유속 측정 장치와 같이 게이트 직하류의 관로에 설치되었다. 공기관의 공기유속은 Pitot관을 공기관의 중앙에 설치하고 공기 유입이 발생할 때 대기압과 공기관의 압력차를 측정하고 자료처리장치를 사용하여 수치로 나타냈으며, 이를 공기유속으로 환산하였다. 공기관을 통하여 방류관으로 유입되는 공기량은 측정된 공기유속에 공기관의 단면적을 곱하여 산정하였다.

수조 유입유량은 유입관로에 설치된 밸브를 사용하여 조절하였으며, 유입유량은 관로유속계를 사용하여 측정하였다. 저수지 방류시 저수위를 고려하기 위하여 수조의 수두는 각 실험조건별로 방류관로로 방류되는 유량과 수조로 유입되는 유량을 동일하게 한 후에 일정하게 유지하였다. 수조 바닥에서부터 최상부까지 설치된 액주계를 사용하여 수조의 수두를 실험조건별로 측정하였다.

3. 수리시험 결과

3.1 측정 자료 분석

구축된 수리모형을 사용하여 게이트 개도율, 수조 수두 높이,

유입유량 등을 조합하여 총 38가지 경우에 대하여 수리실험을 실시하였다. Table 2는 게이트 하류 관로의 흐름을 만관 흐름과 자유수면 흐름으로 구분하여 측정 자료의 범위를 나타낸 것이다. 만관 흐름인 경우의 관 내 유속은 3.27~5.12 m/s의 범위를 나타냈으며, 공기관의 공기유속은 5.60~22.12 m/s의 범위를 나타냈으며, 게이트 직하류 흐름의 Froude 수는 2.3~4.7의 범위를 나타냈다. 자유수면 흐름인 경우의 관 내 유속은 3.26~5.21 m/s의 범위를 나타냈으며, 공기관의 공기유속은 12.27~61.85 m/s의 범위를 나타냈으며, 게이트 직하류 흐름의 Froude 수는 3.3~7.3의 범위를 나타냈다.

게이트 하류의 만관 흐름은 게이트를 통과한 흐름이 공기관 부근에서 도수하여 하류 관을 채워서 흐르는 경우이며, 공기관을 통하여 유입된 공기가 흐름에 연행되어 하류로 이동한다. 만관 흐름의 경우는 개도율이 70~88%의 범위를 나타냈으며, 수조의 수두가 작을 경우에는 개도율이 큰 경우에 만관 흐름이 형성되었으며, 수조의 수두가 큰 경우에는 작은 개도율에서도 만관 흐름이 형성되었다. 수조의 수두가 높고, 개도율이 큰 경우(80% 이상)에는 공기관에 물이 차서 흐르는 잠긴 도수가 발생하였으며, 이 경우에 공기의 유입은 거의 없었다. 특히 Froude 수가 4.7보다 큰 흐름에서는 잠긴 도수가 발생하였으며, Froude 수가 2.3 미만인 흐름에서는 게이트 하류에 만관 흐름이 발생하지 않았다.

게이트 하류의 자유수면 흐름은 게이트 하류에서 약한 도수가 발생한 후 수면이 상승하나 관을 완전히 채우지 못하여 형성된다. 자유수면 흐름이 발생한 실험조건은 개도율은 30~77%의 범위를 나타냈으며, 수조의 수두가 높아질수록 작은 개도율에서 자유수면 흐름이 형성되었으며, 수조의 수두가 낮은 경우에는 큰 개도율에서도 자유수면 흐름이 형성되었다. 게이트를 통과한 후 사류가 발생하고 하류에서 도수가 발생하며, 자유수면 상부에 공기흐름이 발생하기 때문에 공기관의 공기속도가 12.27~61.85 m/s로 만관 흐름보다 컸으며, 공기유입량도 많았다. Froude 수가 3.3 이하인 흐름에서는 만관 흐름이 발생하였으며, Froude 수가 7.3보다 큰 흐름에서는 낮은 수심으로 인해 흐름의 유속을 Pitot관을 이용해서 측정하기 어려웠기 때문에 최대 Froude 수를 7.3으로 제한하였다.

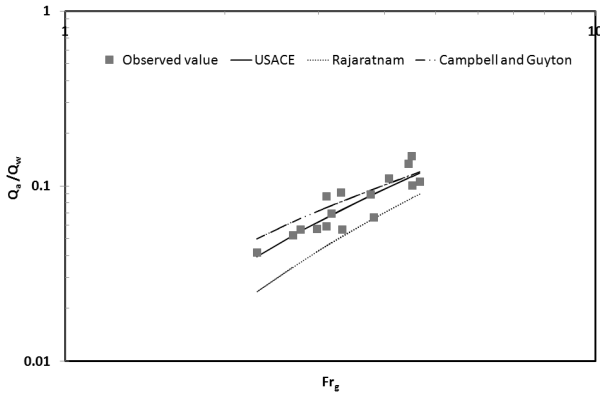


Fig. 3. Comparison of the Experimental Results under Pressurized Flow Conditions with the Estimations of Other Studies

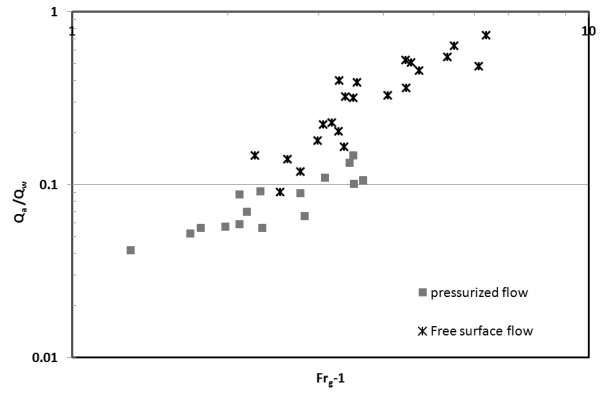


Fig. 5. Relationship Between $\frac{Q_a}{Q_w}$ and $Fr_g - 1$, Varying with Flow Conditions

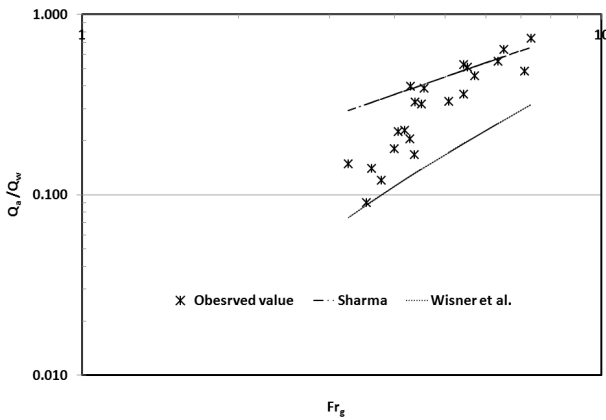


Fig. 4. Comparison of the Experimental Results under Free Surface Flow Conditions with the Estimations of Other Studies

3.2 실험결과의 신뢰성 검토

Fig. 3은 만관 흐름인 경우에 측정된 결과를 Table 1에 제시된 US ACE(1964), Campbell and Guyton(1953), Rajaratnam (1967)이 개발한 식의 추정값과 비교한 것이다. 실험을 통해 산정한 연행공기량은 모두 Rajaratnam 식에 의한 추정 결과보다 큰 값을 나타냈으며, US ACE 추정식과 Campbell and Guyton 식에 의한 추정 결과와 유사한 값을 나타냈다.

Fig. 4는 자유수면 흐름인 경우에 측정된 결과를 Table 1에 제시된 Wisner et al.(1975)과 Sharma(1976)가 개발한 식의 추정값과 비교한 것이다. 실험에서 측정된 자료들은 모두 Wisner et al. 식에 의한 추정 결과보다 큰 값을 나타냈으며, Sharma 식에 의한 추정 결과는 동일한 Froude 수에 분포하는 측정자료 중에서 큰 값들과 유사하였다. 이는 측정 자료들이 Wisner et al. 식과 Sharma 식의 추정 결과들 사이에 위치한다는 것을 의미한다.

3.3 공기연행 현상에 대한 영향인자

공기관을 통해 유입되는 공기량에 대한 영향인자를 파악하기 위하여 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계와 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $\frac{Hr}{Hw}$ 의 관계를 비교하였다. 여기서 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 는 공기관을 통한 공기유입량과 방류량의 비, Fr_g 은 게이트 직하류 흐름의 Froude 수, Hr 은 수조 수두, Hw 는 게이트 직하류 수심을 나타낸다. $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계는 Table 1에 제시한 것과 같이 기존 연구들에서 주로 사용해왔다. 그러나 이들 연구에서는 도수 하류의 흐름 상태를 명확하게 구별하지 않고 측정된 자료를 사용하여 실험식을 개발해왔다. 따라서 본 연구에서는 하류 흐름 조건을 만관 흐름과 자유수면 흐름으로 구분하여 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계를 분석하였다. 또한 Hr 과 Hw 는 하류 흐름 특성을 지배하는 변수들이기 때문에 이들이 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 에 미치는 영향을 분석하였다.

Fig. 5는 수리실험을 통하여 측정된 각 조건들에 대한 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계를 만관 흐름과 자유수면 흐름으로 구분하여 도시한 것이며, 하류 흐름 상태에 따라 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계가 확연히 구별되었다. 특히 두 흐름이 중복되는 영역(Froude 수: 3.3-4.5)에서는 동일한 Froude 수에 대해서 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 가 넓게 분포하였으며, 이들은 흐름 조건에 따라 구분되었다. Fig. 6은 각 조건들에 대한 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $\frac{Hr}{Hw}$ 의 관계를 만관 흐름과 자유수면 흐름으로 구분하여 도시한 것이며, 하류 흐름 상태에 따라 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $\frac{Hr}{Hw}$ 의 관계가 확연히 구별되었다.

Figs. 5 and 6으로 부터 $Fr_g - 1$ 과 $\frac{Hr}{Hw}$ 이 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 에 영향을 미친다는 것이 파악되었다. 또한 두 변수가 Fig. 7과 같이 하류 흐름조건과 무관하게 상관관계가 매우 높은 것으로 분석되었다(상관계수: 0.974). 이는 상류조건(게이트 개도율, 저수지 통관 수위, 방류량)이 방류관의 흐름에 지배적인 영향을 미친다는

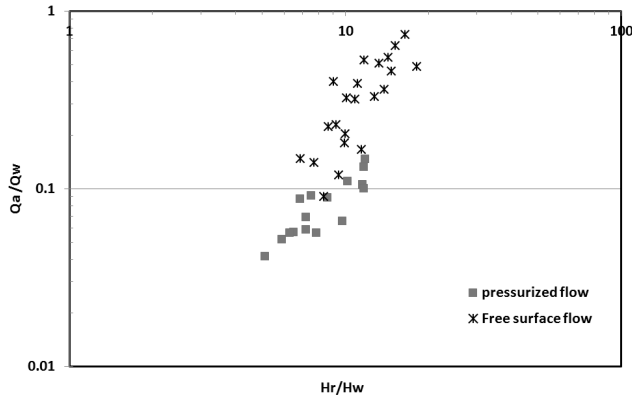


Fig. 6. Relationship Between $\frac{Q_a}{Q_w}$ and $\frac{H_r}{H_w}$, Varying with Flow Conditions

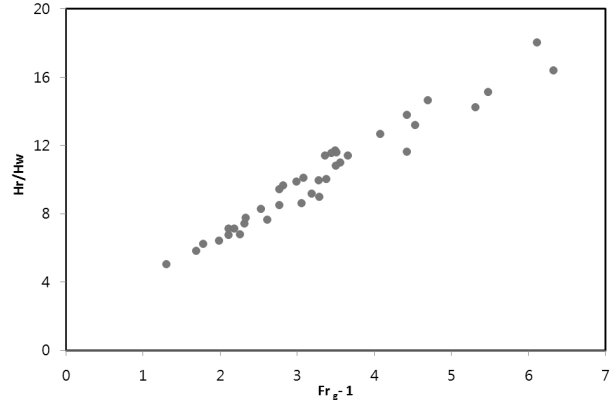


Fig. 7. Relationship Between $Fr_g - 1$ and $\frac{H_r}{H_w}$

Table 3. Experimental Equations Employing $Fr_g - 1$ and $\frac{H_r}{H_w}$ as Variables, Respectively, Varying with Flow Conditions

Variables	Pressurized flow conditions		Free surface flow conditions	
	Equations	R ²	Equations	R ²
$Fr_g - 1$	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0304(Fr_g - 1)^{1.0622}$	0.77	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0271(Fr_g - 1)^{1.8205}$	0.80
$\frac{H_r}{H_w}$	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0069\left(\frac{H_r}{H_w}\right)^{1.156}$	0.74	$\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0037\left(\frac{H_r}{H_w}\right)^{1.8217}$	0.63

것을 의미한다. 이 때문에 두 변수를 독립변수로 사용하여 연행 공기량 추정식을 개발하면 다중공선성으로 인한 문제가 발생할 것으로 사료된다.

3.4 실험식 개발 및 적용성 검토

하류 흐름 조건에 따른 연행공기량 추정식과 이들의 결정계수는 Table 3에 나타낸 것과 같다. 개발된 연행공기량 추정식들의 결정계수를 살펴보면, $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계를 이용하여 개발한 추정식이 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $\frac{H_r}{H_w}$ 의 관계를 이용하여 개발한 추정식보다 정확도가 높은 결과를 나타냈다. 또한 하류 흐름 조건을 구별하지 않고 개발한 연행공기량 추정식을 이용하여 만관 흐름의 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 를 추정하면 실제보다 과다추정될 수 있는 것으로 나타났다.

개발된 연행공기량 추정식의 적용성을 평가하기 위하여 Fig. 8과 같이 하류 만관 흐름에 대하여 추정한 결과를 기존 연구들에 의해 제안된 추정식들에 의한 추정 결과와 비교하였다. Fig. 8과 같이 본 연구에서 개발된 실험식으로 추정한 연행공기량은 Campbell and Guyton 식의 추정 결과보다 작았으며, Rajaratnam 식과 Rabben et al. 식의 추정 결과보다 큰 값을 나타냈다. 비교 대상 추정식 중에서 Kalinske and Robertson 식과 Escaramela 식에 의한 추정 결과가 비교적 작은 값을 나타냈다.

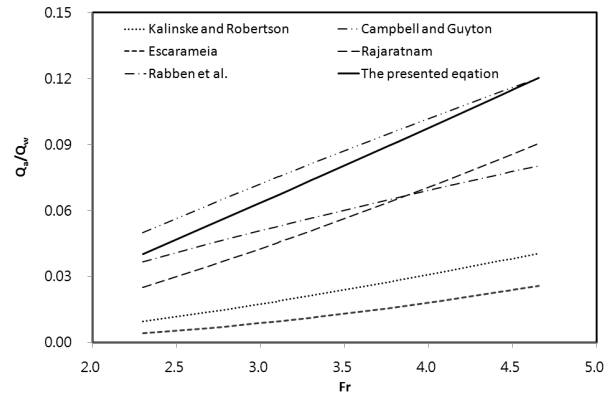


Fig. 8. Comparison of Estimated Amounts of Air drawn in through Air Vents under Pressurized Flow Conditions, Varying with Experimental Equations

공기관 설계는 공기관 내 공기유속과 허용부압수두를 고려하여 공기관의 적정 단면적을 결정하는 것이다. 공기관 설계 절차는 먼저 설계기준을 고려하여 허용부압수두를 결정하고, 흐름 조건을 고려하여 연행공기량을 추정한 후에 공기관 소요 단면적을 산정한다. 공기관의 허용공기유속을 고려하여 단면적의 적절성을 판단하고 적절하지 않는 경우에는 시행착오법으로 동일한 방법을 반복하여 공기관의 최적 단면적을 결정한다. 본 연구에서 개발된 추정식의 적용범위는 Froude 수가 2.3~4.7이므로

대상 저수지 취수시설에서 발생하는 흐름조건을 고려하여 적용 가능여부를 판단해야 한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 저수지 취수탑에 연결된 방류관의 공기관 부근에서 발생하는 공기연행현상에 영향을 미치는 인자들을 수리모형실험을 통해서 파악하고, 이들의 관계를 고려하여 연행 공기량 추정식을 개발하였다. 또한 개발된 추정식의 적용성을 평가하기 위하여 기존 연구들에 의해 제안된 추정식의 추정 결과와 비교하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 저수지 취수탑, 게이트, 공기관, 방류관 등으로 구성된 시스템에서 38가지 수리조건에 대하여 발생하는 수리현상을 수리모형을 이용하여 분석하였다. 게이트 하류에서 만관 흐름이 발생한 경우, 관 내 유속이 3.27~5.12 m/s, 공기관의 공기유속이 5.60~22.12 m/s, 게이트 직하류 흐름의 Froude 수가 1.3~3.7의 범위를 나타냈다. 게이트 하류에서 자유수면 흐름이 발생한 경우, 관 내 유속이 3.26~5.21 m/s, 공기관의 공기유속이 12.27~61.85 m/s, 게이트 직하류 흐름의 Froude 수가 2.3~6.3의 범위를 나타냈다.
- (2) 측정된 자료의 신뢰성을 확보하기 위하여 기존에 발표된 식들을 이용하여 추정된 연행공기량 값과 측정 자료를 비교한 결과, 측정 자료들이 추정값들과 유사하거나 추정값들에 의해 제한되는 범위 내에 위치하는 것으로 나타났다.
- (3) 측정된 자료를 사용하여 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $Fr_g - 1$ 의 관계를 분석한 결과, 게이트 하류 흐름이 만관 흐름인 경우의 연행공기량 추정식은 $\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0304(Fr_g - 1)^{1.0622}$ 이며, 결정계수는 0.77이었으며, 게이트 하류 흐름이 자유수면 흐름인 경우의 연행공기량 추정식은 $\frac{Q_a}{Q_w} = 0.0271(Fr_g - 1)^{1.8205}$ 이며, 결정계수는 0.80이었다. 개발된 두 식은 $\frac{Q_a}{Q_w}$ 와 $\frac{Hr}{Hw}$ 의 관계를 이용하여 개발된 추정식보다 높은 정확도를 나타냈다.

본 연구에서는 공기관의 연행공기량이 게이트 하류의 흐름 조건으로부터 영향을 받는다는 것을 확인했으며, 흐름 조건을 고려하지 않은 추정식을 이용하면 효율적인 설계가 어려운 것으로 나타났다. 따라서 정확한 공기관 설계를 위해서는 해당

시설물의 특성을 반영한 연행공기량 산정식이 필요하며, 이를 위해서 수리모형을 통한 영향인자들의 확인과 측정 자료의 신뢰성 확보가 선행되어야 할 것으로 사료된다.

References

- 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, USA, pp. 529-533.
- Escaramia, M. (2007) Investigating hydraulic removal of air from water pipelines. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Vol. 160(1), pp. 25-34.
- Jeong, S.O. and Yoon, D.G. (2011) Criteria on design of air vents of reservoirs' intake towers. *Magazine of Korea Water Resources Association*, Vol. 44(3), pp. 59-67.
- Kalinske, A.A. and Robertson, J.M. (1943) Closed conduit flow. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 108, pp. 1453-1516.
- Korea Water Resources Association (KWRA) (2005) Criteria of dam design. KWRA, Seoul.
- Ministry of Agriculture (MOF) (2002) Criteria on planning and design of agricultural infrastructure refurbishment projects: Fill dam. MOF, Seoul.
- Mortensena, J.D., Barfussb, S.L., and Johnsonb, M.C. (2011) Scale effects of air entrained by hydraulic jumps within closed conduits. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 49, No. 1, pp. 90-95.
- Mortensena, J.D. (2009) *Factors affecting air entrainment of hydraulic jumps within closed conduits*, Thesis of Utah State University, Logan, Utah, USA.
- Sharma, H.R. (1976) Air-entrainment in high head gated conduits. *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 102(11), pp. 1629-1646.
- Rabben, S.L., Els, H., and Rouve, G. (1983) Investigation on flow aeration at offsets downstream of high-head control structures. *Proceedings of the 20th Congress of the International Association of Hydraulic Research*, Moscow, USSR, Vol. 4, pp. 354-360.
- Rajaratnam, N. (1967) Hydraulic jumps. *Advances in Hydrosiences*, Ed. V. T. Chow, Vol. 4, pp. 197-280, Academic Press, Newyork, USA.
- US Army Corps of Engineers(US ACE) (1964) Air demand: Regulated outlet works. *Corps of Engineers Hydraulic Design Criteria*, Vol. 1, Sheet 050-1, US ACE, USA.
- Wisner, P.E., Mohsen, F. L., and Kouwen, N. (1975) Removal of air from water lines by hydraulic means. *Journal of Hydraulic Division*, Vol. 101(2), pp. 243-257.