J. Korea Water Resour. Assoc. Vol. 55, No. 5 (2022), pp. 383-392
doi: 10.3741/JKWRA.2022.55.5.383
pISSN 2799-8746
eISSN 2799-8754

Development of seawater inflow equations considering density difference between seawater and freshwater at the Nakdong River estuary

Jeong, Seokil[a] · Lee, Sanguk[b] · Hur, Young Teck[c] · Kim, Youngsung[d]* · Kim, Hwa Young[e]

[a]Senior Researcher, Nakdonggang River Basin Management Department of K-water, Daegu, Korea
[b]Principal Researcher, Water Resources & Environmental Research Center of K-water, Daejeon, Korea
[c]Principal Researcher, Water Resources & Environmental Research Center of K-water, Daejeon, Korea
[d]Head Researcher, Water Resources & Environmental Research Center of K-water, Daejeon, Korea
[e]General Director, Busan Office of K-water, Busan, Korea

Paper number: 22-023
Received: 11 April 2022; Revised: 29 April 2022; Accepted: 29 April 2022

Abstract

The restoration of the Nakdong River estuary is one of the most important projects of the Ministry of Environment, Republic of Korea. A real-scale experiment of gate operation was executed from 2019 to 2020, and a pilot operation was performed in 2021. The gate of Nakdong River Estuary Barrier (NEB) is supposed to be continuously opened based on the experiment results. Many critical decisions should be made immediately during the experiment based on the real-time measured data and numerical analysis considering the seawater inflows. The decision-making sequence was made systematically with the accurate estimation of seawater inflow. The estimation of seawater inflow is the main research objective and the equations of seawater inflow were developed, reflecting the structural characteristics of NEB. The inflow equations were developed in two forms, overflow and underflow. ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) was used to measure seawater inflow, check the accuracy of the developed equations, and derive the flow coefficient. The comparison error of the developed equations was about 3% compared to the measured data.

Keywords: Nakdong River estuary barrier, Seawater-inflow, Equations, Underflow, Overflow, Measured discharge

해담수 밀도차를 고려한 낙동강하굿둑 해수유입량 산정식 개발

정석일[a] · 이상욱[b] · 허영택[c] · 김영성[d]* · 김화영[e]

[a]K-water 낙동강유역관리처 선임연구원, [b]K-water 수자원환경연구소 책임연구원, [c]K-water 수자원환경연구소 책임연구원,
[d]K-water 수자원환경연구소 수석연구원, [e]K-water 부산권지사 지사장

요 지

낙동강하굿둑 기수역의 복원이 국정과제로 채택되면서, 2019~2020년의 실증실험과 2021년 시범운영을 거쳐 2022년 기수역 복원이 공식화 되었다. 해수유입 시 많은 의사결정이 실시간으로 수행되어야 하므로, 실측과 수치해석을 이용한 의사결정시스템이 체계화되었으며, 이 과정에서 정확한 해수유입량 산정이 필요하였다. 이에 본 연구에서는 해수와 담수의 밀도차이와 낙동강하굿둑 수문의 구조적인 특성을 반영한 해수유입량 산정식을 개발하였다. 낙동강하굿둑 수문은 월류와 저류방식으로 해수유입이 가능하므로, 산정식 또한 두 가지 형태로 제시하였다. 개발된 식의 정확도 확인 및 유량계수 도출을 위하여 시범운영 기간동안 ADCP를 이용하여 해수유입량을 실측하였다. 완성된 식을 이용한 계산값과 실측값의 비교 결과 약 3%의 오차를 확인하였다.

핵심용어: 낙동강하굿둑, 해수유입, 산정식, 저류, 월류, 유량 실측

***Corresponding Author.** Tel: +82-42-870-7432
E-mail: yskim@kwater.or.kr (Y. Kim)

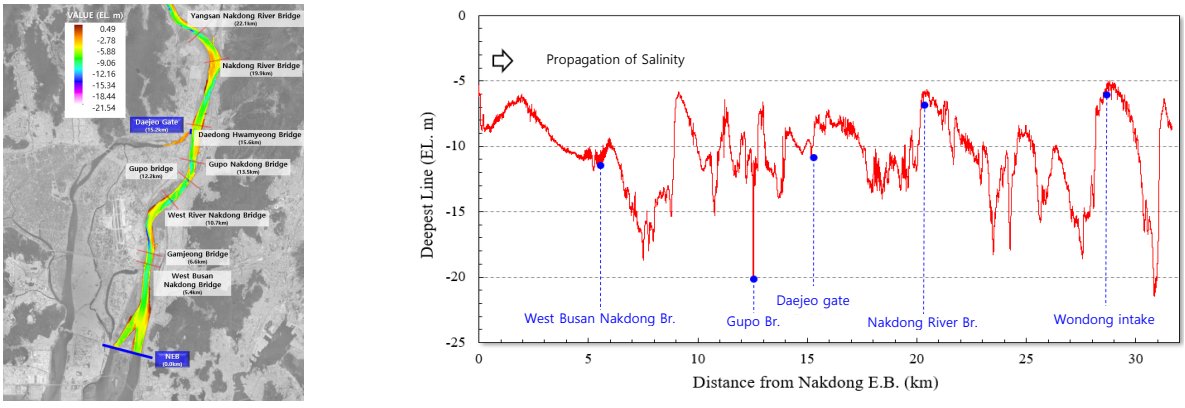
© 2022 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

1. 서 론

낙동강하굿둑 개방은 2017년 국정운영 5개년 계획 국정과제(환경부)로 반영되어 '낙동강 하구 환경관리를 위한 실무협의회'가 구성되면서 본격적으로 진행되었다. 이후 2017~2021년 시범운영을 거쳐 2022년 2월 기수역 조성이 공식화됨에 따라 하굿둑은 지속적인 생태소통이 가능하게 되었다. 기수역은 담수와 해수가 만나 공존하는 곳으로 육상 및 해양의 다양한 원소들의 생지화학적 반응이 활발히 일어나는 지역이다(Anderson *et al.*, 1982). 실증실험은 다양한 상황에서 안정적으로 목표 기수역을 조성하고, 계절별 생태소통 모니터링을 위해 수행되었다. 특히 2021년 시범운영은 4차에 걸쳐 해수를 유입하면서, 계절별로 수문운영 방식과 개도를 조절하면서 해수유입량을 실측하고, 조성된 기수역에 유입되는 기수어종을 모니터링 하였다. 이러한 결과를 바탕으로 다양한 상황에서의 의사결정 및 모니터링 방식이 체계화되었다. 시범운영과 같이 해수가 유입되는 상황에서는 수문의 개폐 정도, 상류유량 조절, 민원 대응 등에 대한 의사결정이 실시간으로 필요하며, 이를 위해 계측장비 및 수치해석을 통해 정보를 제공받게 된다. 계측장비는 하굿둑으로부터 각각 0.0 3.0, 5.0, 7.5, 9.0, 12.0, 15.0 km 지점에 설치되어 해수유입으로 인한 염분 전파 상황을 실시간으로 확인하였으며, 2D (CE-QUAL-W2) 및 준 3D (EFDC) 모형을 활용한 수치해석을 지속적으로 수행하여 염분의 거리 및 도달 시점 등을 사전에 파악하여, 기수역 조성 의사결정을 위한 정보를 제공하였다. 그러나 모델링을 통한 정확한 의사결정을 수행하기 위해서는 정확도 높은 시계열 해수 유입량 정보가 요구된다.

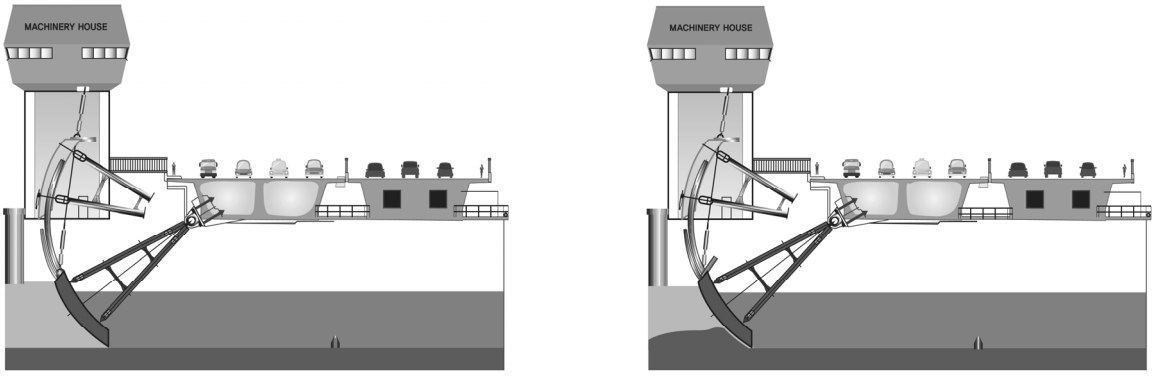
낙동강하구의 지형은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 5~9 km 사이에 깊은 골이 형성되어 있고, 수문 개방 시 고밀도의 염분이 바닥을 따라 9 km까지 원활하게 밀려 들어오는 구조이다. 9 km를 넘게 되면, 다시 구포대교 교각 세굴로 인한 12 km 지점까지 염분이 쉽게 전파될 수 있으며, 이를 다시 넘어서면 15 km 지점의 대저수문까지 도달할 가능성이 높다.

대저수문은 서낙동강의 용수를 공급하는 주요 수문으로 이곳을 통해 염분이 서낙동강으로 흘러 들어가게 되면, 각종 용수에 대한 염해 피해는 불가피하다. 이에 시범운영 단계에서는 실무적으로 낙동강 하구의 기수역 목표 범위를 대저수문(약 15 km 지점) 하류까지로 결정할 수밖에 없으며 이러한 상황을 감안했을 때, 정확한 해수유입량의 산정은 기수역 목표 범위를 안정적으로 유지하는데 필수적이다. 그러나 기건설된 하굿둑을 개방하여 기수역을 조성하고자 하는 사례는 낙동강 하굿둑이 유일하기에 하굿둑을 통해 해수가 담수역으로 유입될 때의 유량 산정 연구는 많지 않았다. 다만 하구에서의 유량계수 산정에 대한 연구는 지속적으로 수행되어 왔다. Caldwell (1955)는 하구에서의 내외수위차에 의해 발생되는 유속의 유량계수를 0.5로 제시하였고, O'Brien and Clark (1975)은 실제 하구에서의 내외조위를 이용하였고, Mayor-Mora (1975)은 수리실험에서 손실계수 및 Darcy-weisbach의 마찰손실계수의 항을 고려한 유량계수를 제시하였다. 그 외 Kreeke (1967), Bennett (1976) 및 Halliwell (1967)은 조도계수를 이용한 유량계수를 제시하였는데, 이러한 연구들은 하류 수심의 영향을 크게 고려하지 않았다. 이에 Smith (1959), Simon (1987) 및 Kandaswamy *et al.* (1959) 등이 하류수심을 주요 변수로 한 유량계수를 제시하였다. 낙동강하굿둑의 해수 유입은 하류(담수측)의 영향을 받을 수밖에 없는 구조이기는 하나, 유입되는 해수의 양이 구조물의 크기에 비하여 많지 않으며, 작은 오차로도 염분 도달거리 예측에 큰 어려움이 따를 수 있다. 그리고 Fig. 2와 같이 낙동강하굿둑 수문은 주수문과 조절수문



(a) River bed of Nakdong River estuary (b) Deepest bed line

Fig. 1. River topography and structures of Nakdong River estuary



(a) Main gate (b) Control gate

Fig. 2. Gates of Nakdong River estuary barrier (http://eiwms.kwater.or.kr)

으로 구성되어 있는데, 해수유입시에는 조절수문만 사용되며, 조절수문의 바닥부분에는 돌출부가 있어 저류(Underflow) 형태로 해수유입 시 일반적인 공식으로 정확한 유량을 산정하기 쉽지 않은 실정이다. 이에 낙동강하굿둑의 구조적인 특성을 반영한 정밀도 높은 해수유입량 산정식을 개발하였으며, 산정식의 정확도 확인 및 유량계수 도출을 위하여 ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) 를 이용한 실측을 2021년 4번의 시범운영 기간 동안 지속적으로 수행하였다. 낙동강하굿둑의 수문(Gate)은 월류(Overflow)와 저류(Underflow)가 모두 가능한 형태이므로 해수유입식 또한 두가지 형태로 나누어 제안하였다.

2. 해수유입량 산정식

목표 기수역 조성을 목적으로 하는 낙동강하굿둑의 수문운영은 월류와 저류 방식을 조합할 때, 생태적으로 효과가 더 크다고 판단하여, 두 방식을 혼합하여 사용하고 있다. 월류와 저류의 수리특성이 동일하지 않으므로 두 가지 형태로 나누어 해수유입량 식을 제시하였다.

2.1 월류(Overflow)에 대한 해수유입량 산정식

월류방식은 하굿둑 기준 내외 수위 변화에 따라 탄력적으로 월류 수심 조정이 가능하여 저류방식에 비해 상대적으로 해수 유입량을 정밀하게 조절할 수 있다. 수문 상단의 형태가 예언(Sharped crest)이라고 가정할 때, 잠수월류 시의 유량 산정은 Villemonte (1947)의 방법을 채용하였다. Villemonte (1947)의 기본 개념은 Fig. 3과 같이 중첩의 원리를 이용하는 것이다.

위어(Weir)의 높이를 초과하는 상류와 하류의 수위가 발생

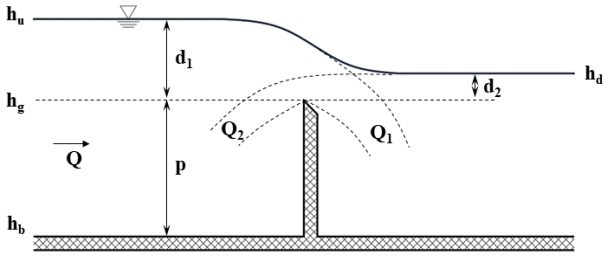


Fig. 3. Basic concept of discharge in submerged flow (Tullis *et al.*, 2007)

하였을 때, 한쪽을 배제하고 완전월류로 가정한 후, 각 유량값의 차이를 잠수월류시의 유량으로 가정한 것이다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$Q = Q_1 - Q_2 \tag{1}$$

$$\frac{Q}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \tag{2}$$

Eq. (2)는 실험을 통해 $\frac{Q}{Q_1}$이 $1-\frac{Q_2}{Q_1}$과 관계가 있지만, 수식에서처럼 선형적인 관계는 아니었다(Villemonte, 1947). 이에 식은 다음과 같이 지수형태로 변화될 수 있다.

$$\frac{Q}{Q_1} = k\left(1 - \frac{Q_2}{Q_1}\right)^m \tag{3}$$

Villemonte (1947)는 7가지 형태의 예언위어 실험을 통해 k와 m 값을 도출하였으며, 최종적으로 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$\frac{Q}{Q_1}=\left(1-\frac{Q_2}{Q_1}\right)^{0.385} \tag{4}$$

Eq. (4)는 잠수월류의 유량은 완전월류의 유량공식으로 계산이 가능하다는 것을 보여준다. 예언위어(Sharped weir)를 통과하는 완전월류 유량공식은 수축이 없는 2차원 흐름과 벽효과(양안에 의한 수축효과)를 무시했을 때를 가정한 상태에서, 비에너지(Specific energy) 범위에 걸쳐 적분하면 다음과 같이 표현된다(Henderson, 1966).

$$q=\frac{2}{3}C_c\sqrt{2g}\left[\left(\frac{v_o^2}{2g}+(h_u-h_g)\right)^{3/2}-\left(\frac{v_o^2}{2g}\right)^{3/2}\right] \tag{5}$$

여기서, q는 단위폭당 유량(m^2/s), g는 중력가속도(m/s^2), C_c는 계수, v_o는 접근유속(m/s)이다.

이를 간단하게 정리하면 다음과 같다.

$$q=\frac{2}{3}C_d\sqrt{2g}\,(h_u-h_g)^{3/2} \tag{6}$$

$$C_{d=}C_c\left[\left(1+\frac{v_o^2}{2g(h_u-h_g)}\right)^{3/2}-\left(\frac{v_o^2}{2g(h_u-h_g)}\right)^{3/2}\right] \tag{7}$$

$h_u-h_g=d_1$이라 할 때, Henderson (1966)은 C_c는 d_1/p의 함수이며, C_d와 d_1/p의 관계가 Eq. (8)로 근사함을 확인하였다.

$$C_d=0.611+0.08d_1/p \tag{8}$$

해수가 유입될 때 낙동강 하굿둑의 수문을 통과하는 유속은 매우 작으므로, Eq. (7)의 $\frac{v_o^2}{2gd}$는 값이 작아 무시할 수 있을 것이다. 이에 잠수월류시의 식은 Eq. (9)와 같이 표현할 수 있다. 본 연구에서도 낙동강하굿둑 월류시의 기본공식을 Eq. (9)로 결정하였으며, 실시간 실측되는 data를 고려하여 변수를 결정하였다.

$$q=f_rC_dC_o2/3\sqrt{2g}\,(h_u-h_g)^{3/2} \tag{9}$$

여기서, f_r은 $\left[1-\left(\frac{h_d-h_g}{h_u-h_g}\right)^{1.5}\right]^{0.385}$이고, C_o는 조위 및 내수위의 변화에 따라 달라지는 수리특성과 낙동강하굿둑 수문의 구조적 특성을 나타내는 계수로써 정확한 유량 산정을 위하여 추가하였다. 이 값은 2021년 4차례에 걸쳐 수행한 해수유입량 실측을 통해 회귀분석으로 도출하였다.

2.2 저류(Underflow)에 대한 해수유입량 산정식

해수와 담수가 만나는 하굿둑에서 저류(Underflow) 형태로 수문을 개방할 경우, 동일 수위에서도 해수-담수 밀도차에 의해 정수압 차이가 발생하여 해측에서 담수 방향으로 흐름이 발생한다. 조위가 크지 않은 낙동강하굿둑 특성상 이러한 밀도 차이는 해수유입량에 영향을 줄 수 있다. 일반적으로 해수유입량을 계산할 때, 해측 조위에 밀도차에 의한 보정 수위를 더하여 계산하며, Bernoulli 방정식을 이용하여 유량을 표현하면 다음과 같은 식의 형태가 된다.

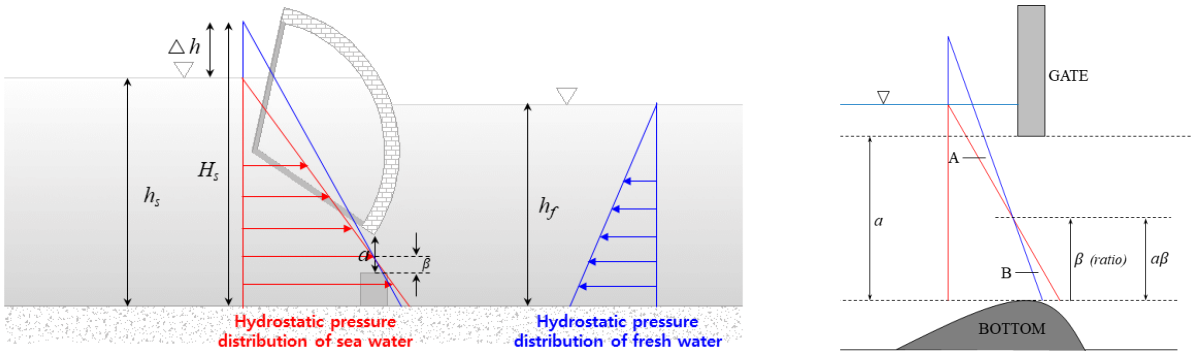
$$q=C_ua\sqrt{2g(H_s-h_f)} \tag{10}$$

여기서, C_u는 저류 시 유량계수, a는 수문의 개도(m)이며, $H_s=h_s+\triangle h$로 상대적으로 고밀도의 해수를 담수의 밀도로 치환하였을 때의 가상의 수위이다($\triangle h$는 밀도차 보정 수심값).

수문의 개도에 따라 수문 주변부 수리특성이 변화하고, 유량공식에 이러한 복잡한 변화를 모두 반영시킬 수 없으므로, 정수압의 차에 의한 단순화된 유량공식을 적용하기 위해 해수-담수 밀도차 보정이 선행되어야 한다. 낙동강하굿둑 조절수문은 바닥에 돌기(Sill)가 있으므로, 바닥부터 계산되는 단순 정수압 보정을 적용하기 힘들다. 이는 바닥부에서 담수 환산된 정수압과 해수 정수압이 동일할 경우, 수문을 통과하는 유량이 담수 환산된 정수압이 해수 정수압에 의해 계산된 값보다 크게 되기 때문이다.

이에 본 연구에서는 조절수문의 해수-담수 밀도 보정 시 유량을 산정하는 개도(a) 중 β(Ratio) 지점에서 밀도 보정된 정수압과 해수 정수압이 동일하다고 가정하였다. Fig. 4(a)에서 좌측의 해수 정수압선(붉은선)과 보정된 정수압선(파란선)이 도시되어 있는데, 우측의 담수 정수압은 일정하다. 이를 중첩시켜 해측과 담수측의 정수압 차이에 의해 유량을 도출하였을 때, 해수 밀도로 계산된 값과 담수로 보정된 밀도로 계산된 값이 동일해야 하는데, 이를 만족시키는 해수 정수압과 보정된 정수압이 동일한 지점이 β 지점이다. Fig. 4(b)는 수문 주변의 압력 분포에 대해 확대한 그림으로, 결국 면적 A와 B가 동일한 지점이 β인 것이다. 이러한 가정하에 밀도 보정에 대해 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$p=\gamma gh \tag{11}$$



(a) Hydraulic pressure distribution (left: sea water; right: fresh water) (b) Enlarged around gate

Fig. 4. Conceptual diagram of NEB gate

$$p_s = \gamma_s g h_s = \gamma_f g H_s \tag{12}$$

$$\gamma_s (h_s - \beta a) g = \gamma_f (H_s - \beta a) g \tag{13}$$

$$H_s = h_s + \triangle h = \frac{\gamma_s h_s - \beta a(\gamma_s - \gamma_f)}{\gamma_f} \tag{14}$$

$$\triangle h = \frac{\gamma_s h_s - \beta a(\gamma_s - \gamma_f)}{\gamma_f} - h_s \tag{15}$$

(낙동강하굿둑 조절수문 조위 환산식)

여기서, H_s는 환산된 해측 수심(m), γ_s는 해수 단위중량(kg/m^3), γ_f는 담수 단위중량(kg/m^3)이며, h' 밀도 보정된 해측 정수압(m), β는 $1/3 < \beta < 1/2$의 범위를 갖는다. β값은 계산에 의해 구할 수 있는 값이지만, 실규모 실험을 기반으로 해수유입량 산정식을 도출하므로 기상여건, 수온 등으로 오차가 발생할 수밖에 없는 상황이므로, 결정짓는 것보다 작은 범위 내에서 보정계수 의미도 갖도록 설계하는 것이 효과적이라고 판단하였다. Eq. (15)는 저류로 해수 유입 시 수문개도, 내·외측 수위 및 수문 주변 염분도에 따라 정수압 보정 결과가 달라질 수 있음을 보여준다. 저류시의 해수유입량 공식은 Eq. (15)를 Eq. (10)에 대입하고, ADCP 실측 data를 이용하여 C_u를 도출하여 완성하였다.

3. 유량계수

3.1 ADCP를 이용한 해수유입량 실측

2021년 4차례의 시범운영 기간 동안 8번의 대조기에 해수를 유입하였고(Table 1), 해수유입 개시 전후를 포함하여 ADCP로 해수유입량을 연속 측정하였다. 유량에 사용된 ADCP는 Telehyne RDI사의 RiverRay 제품으로 최대 ±20 m/s 범위를 0.3% 오차로 유속측정이 가능하다.

이동식 ADCP 측정시 일정한 이동속도를 유지시켜 정확도를 높이고, 계측자의 안전성을 확보하기 위해 Fig. 5(b)와 같은 ADCP 자동이동 장치를 설치하였다. 자동이동 장치는 회전속도 조절이 가능한 모터와 철제 와이어로 구성되었으며, 약 4분 동안 47.5 m거리를 왕복(0.16~0.18 m/s)하도록 설계되었으며, 수문 상류(해측)으로 약 30 m 지점의 교각 사이에 설치되었다. 해수유입에 대한 ADCP의 유량측정 간격은, 47.5 m의 수문폭과 저유량 시의 유속 등을 고려하여 10분으로 결정하였다. ADCP는 지정된 조절수문 구간을 왕복하며, 수심과 유속을 격자 단위로 측정하고(Fig. 6), 이를 적분하여 통과 유량을 취득한다. 그러나 바닥 및 벽 인근의 유속은 측정되지 못하는 단점이 있는데, 본 연구에 사용된 ADCP는 Chen (1991), Simpson and Oltmann (1990)이 제안한 지수 공식에 의해 바닥 유속을 외삽(Extrapolation)하여, 전체 통과유량을 계산하게 된다. Eq. (16)은 ADCP에 적용된 외삽공식이다.

$$\frac{u}{u*} = 9.5 \times \left(\frac{z}{z_o}\right)^b \tag{16}$$

여기서, u는 바닥으로부터 z(m)위치에서의 유속(m/s), $u*$는 전단유속(m/s), z_o는 바닥 조고(m)이고, b는 상수로 일반적으로 Chen (1991)이 제안한 1/6의 값을 사용하였다.

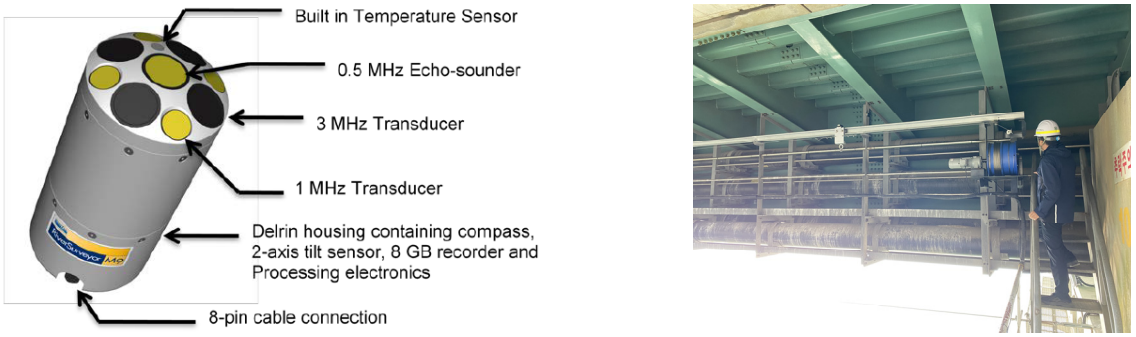
ADCP의 실측은 해수 유입이 예상되는 시점 30분 전부터, 해수 유입이 중단된 후 30분 후까지 시 수행하였으며, 0.5~184.4 m^3/s범위에서 측정하였다.

3.2 월류 시 해수유입량 유량계수 산정

기수역에서는 위어를 월류하는 흐름 발생 시에도 해수와

Table 1. Time and method of seawater-inflow

Period of pilot test	Period and Number of seawater inflow	Type of gate operation							
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8
1st (4.25~5.21)	8 times (4.26~4.29)	under-flow	under-flow	over-flow	over-flow	over-flow	over-flow	over-flow	over-flow
2nd (6.22~7.20)	[2-1] 7 times (6.22~6.28)	under-flow	under-flow	under-flow	over-flow	over-flow	over-flow	under-flow	-
	[2-2] 3 times (7.13~7.15)	under-flow	under-flow	under-flow	-	-	-	-	-
3rd (8.20~9.11)	[3-1] 1 time (8.20)	under-flow	-	-	-	-	-	-	-
	[3-2] 6 times (9.6~9.11)	under & over	over-flow	over-flow	under-flow	under-flow	under-flow	-	-
4th (10.19~11.12)	[4-1] 5 times (10.19~10.23)	over-flow	over-flow	over-flow	over-flow	over-flow	-	-	-
	[4-2] 8 times (11.3~11.7)	under-flow	over-flow	under-flow	over-flow	under-flow	over-flow	over-flow	over-flow



(a) M9 ADCP features (b) Auto moving system

Fig. 5. Current measuring system of NEB control gate (#9)

Fig. 6. Current measuring using ADCP & auto moving system

담수의 밀도 영향을 받는다. 그러나 낙동강하굿둑은 일반적으로 담수 방류 이후에 해수가 유입되는데, 방류된 담수는 밀도차로 인하여 해수보다 상층부에 위치하므로, 월류형태로 해수유입 시 저류방식에 비해 상대적으로 염분 농도가 낮은 해수가 유입된다. 또한 월류 수심이 크지 않아 월류시 해수·담수 밀도 차이로 인한 영향은 수 mm 미만으로 확인되어, 월류량 공식 산정 시 해수와 담수의 밀도차를 배제하였다.

앞에서 기술한 바와 같이 Eq. (9)의 C_o는 낙동강하굿둑의 수리적 특성을 내포하고 있으며, 실측 data를 이용한 분석을 통해 상하류 수위 차에 관계가 있음을 확인하였다. C_o는 일정한 상수가 아닌 수문 주변의 제반특성 변화에 따라 값이 달라지므로, 매개변수 결정이 중요하다. Tullis (2011), Tullis and Neilson (2008) 및 Alhamid (1999) 등은 수리적 특성에 기인한 잠수월류 시의 유량계수는 위어 상단고를 기준으로 한 상하류 수심의 비(ratio)인 d_1/d_2의 함수라고 제시하였고, Arvanaghi and Oskuei (2013), Bilhan *et al*. (2016), Song *et al*. (2009) 및 Robertson *et al*. (1988) 등은 완전월류 시 d_1/p과 유량계수의

관계를 정리하였다. 그리고 Crookston and Tullis (2012)은 부분적인 잠수월류 상태에서도 d_1/p_1과 유량계수의 관계가 뚜렷하게 나타남을 확인하였다. 이러한 선행연구들의 주요 매개변수를 적용하여 낙동강하굿둑의 실측 data를 기반으로 경향성 분석결과 d_1/p_1은 낙동강하굿둑 유량계수 관계식의 주요 매개변수로 적합하였다. 잠수월류 시의 주 매개변수인 상하류 수심비(d_1/d_2)는 f_r에 반영되었다. d_1/p_1와 해수유입량과의 일정 관계가 나타나는 것은 위어 선단부의 돌출 등 낙동강하굿둑 수문만의 구조적인 특징, 지형 등으로 상류(해측)의 영향이 기존 연구 환경(실내 실험장)보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 낙동강하굿둑의 특성상 월류시 $p \gg d_1$이고, $d_1/p \approx f(d_1)$의 관계가 성립될 수 있었으며, 작은 수위 차이에서도 명확한 유량계수가 도출될 수 있는 사용성 향상을 위하여 d_1을 변수로 결정하여 회귀분석을 진행하였다. Fig. 7은 d_1과 유량계수 C_o의 관계를 도시한 것으로, 동일한 $d_1=(h_u-h_g)$에 대해 C_o값을 평균한 것이며, Eq. (16)은 이 과정을 통해 도출된 유량계수 값을 정리한 것이다. 도출된 회귀곡선식의 R^2값은 d_1= 0.73 m을 기준으로 각각 0.77과 0.48로 확인되었다. d_1값이 커질수록 유량계수 증가율이 감소되었으며, d_1= 0.73 m 이후는 직선에 수렴하였다. 이는 월류수심이 작을수록 수문 상단부(crest)에 많은 영향을 받는다는 의미로 판단되며, 일정 수심 이상에서는 그 영향이 크지 않다는 것으로 해석할 수 있다.

$$\begin{cases}(h_s-h_g) \geq 0.73; & C=1.0\\ (h_s-h_g) < 0.73; & C=-1.24629(h_s-h_g)^2 \\ & \quad +1.67410(h_s-h_g)+0.43734\end{cases}$$
$$(\text{단, } 0.2m \leq (h_s-h_g) \leq 1.60m) \qquad (17)$$

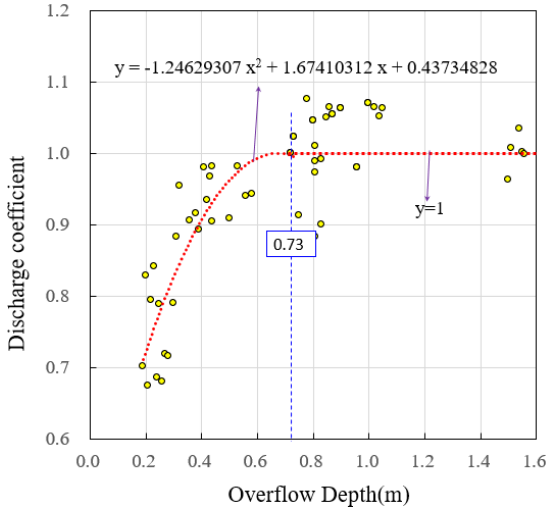


Fig. 7. Discharge coefficient (C_o) equations for overflow

3.3 저류 시 해수유입량 유량계수 산정

낙동강하굿둑의 해수유입은 조절수문이 이용된다. Fig. 1 (b)에서 보는 바와 같이 조절수문의 바닥은 sill이 설치되어 있고, 이러한 구조적인 특성은 유수 단면적을 수문개도에 비선형으로 변화하게 만든다. 따라서 개도의 변화에 따라 수리특성 및 유량계수가 변할 수밖에 없는 구조로 판단된다. Fig. 8는 이러한 구조적인 특성을 보여준다. 그림에서 보는 바와 같이 $a < a'$이므로 개도에 따른 단면적 변화가 선형적이지 않으며, 상술한 해수-담수의 밀도차이로 인한 정수압의 차이 또한 개도와 관련이 있다. 결국 유량계수 값은 개도에 따른 유량의 투영면적 변화와 해수-담수 정수압의 차이에 대한 보정의 의미를 담고 있다고 판단된다. 그러나 많은 연구들에서는 유량계수를 결정하는 주요 매개변수를 a가 아닌 상류 수심과 개도의 비(h_u/a 또는 a/h_u)로 제시하고 있다(Clemmens *et al.*, 2003; Shayan and Farhoui, 2014; Henry, 1950; Swamee, 1992; Wahl, 2005; Belaud *et al.*, 2009). 본 연구에서도 a/h_u를 주요 매개변수로 실측 data기반의 회귀분석을 수행하여 C_u값을 도출하는 시도를 수행하였으나, 낙동강하굿둑은 대부분의 경우 $1/h_u$의 범위가 크지 않으며(0.15 < < 0.20), 변수에 대한 민감도가 커 실무적으로 이용하기 쉽지 않다고 판단하였다. 또한 $1/h_u$을 제외한 a를 주요 매개변수로 결정하였을 경우 경향성이 보다 확실하게 나타났다. 이에 개도(a)에 따른 유량계수 C_u를 ADCP를 이용한 실측 data를 이용해 도출하였다.

Fig. 9에 도시된 점들은 동일 개도에 대해 도출된 유량계수 값을 평균한 것이다. 기상조건 등으로 인하여 저유량 시 유량계수 범위가 상대적으로 컸으나, 평균값을 취했을 때, 개도 2 m 이하에서는 2차 곡선, 2 m 이상에서는 직선식에 수렴함을 알 수 있었다. 이 때, R^2값은 개도 2 m이상과 이하에서 각각 0.88, 0.98로 도시된 곡선식이 개도에 따른 유량계수 값을 적절하게 반영하였다고 판단된다. 개도가 커질수록 곡선의 기울기가 완만해 지는 것은 작은 개도에서 수문 및 바닥 돌출부의 영향이 더욱 크며, 개도가 커질수록 이에 대한 영향이 작아짐을 의미

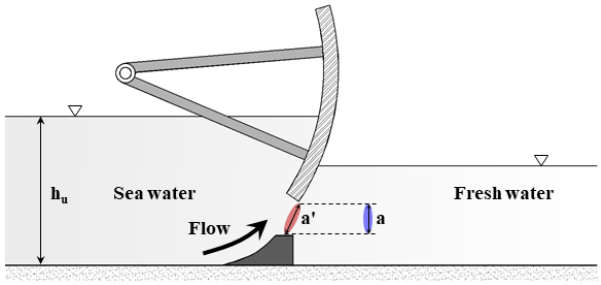


Fig. 8. Changing in the flow-area according to the opening of radial gate

한다. 2 m 이상의 개도에서 유량계수가 개도에 선형적으로 변화된다는 것도 유수단면적 및 수문 주변의 구조적인 특성으로 인한 흐름 저항이 2 m 이상에서는 크지 않은 영향을 준다는 의미로 해석될 수 있다. 월류와 저류시의 이러한 구조적 특성 변화에 따른 수리특성 변화는 3차원 수치해석과 수리실험을 통해 향후 정밀하게 분석되어야 할 것이다. Eq. (18)은 도출된 유량계수 값을 정리한 것이다.

$$\begin{cases} a \leqq 0.2m; & C_u = -0.10578a^2 + 0.48346a + 0.04217 \\ a > 0.2m; & C_u = 0.01235a + 0.56316 \end{cases}$$
$$(0.5m < a < 3.0m) \quad (18)$$

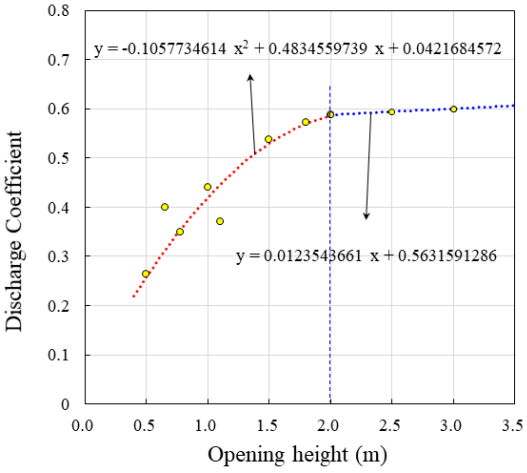


Fig. 9. Discharge coefficient (C_u) equations for underflow

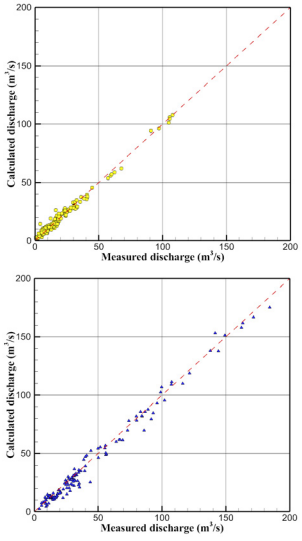
4. 결과분석

월류유입 시 유량계수 식인 Eq. (17)과 저류유입 시 유량계수 식인 Eq. (18)을 각각 Eq. (9)와 Eq. (10)에 대입하여 낙동강 하굿둑 해수유입량 공식을 완성하였다. 해수유입량 식의 정확도 확인을 위해 ADCP 실측 data와 비교하였으며, 이를 Fig. 10에 도시하였다.

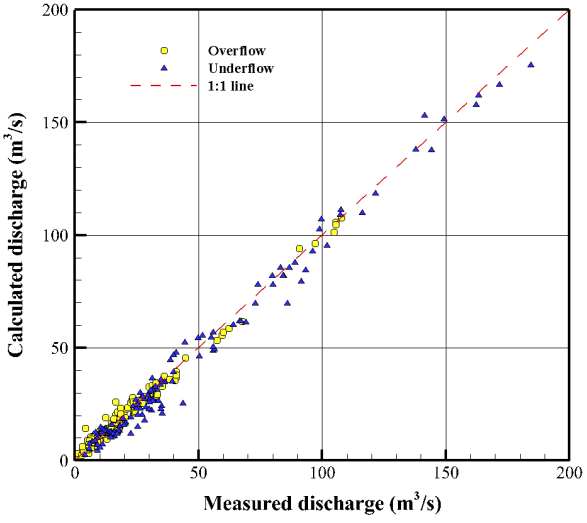
Fig. 10에서 보듯이 본 연구에서 제안한 낙동강하굿둑 해수유입량 공식은 0~200 m^3/s 범위 내에서 실측 data와 크게 다르지 않은 결과를 도출하였다. 전체적인 오차는 2.41% 이며, 부분적으로 월류시는 0.87%, 저류시에는 3.68%를 나타내어, 월류와 저류시 모두 정확하게 해수유입량을 계산하였다. 기수역 조성범위를 낙동강하굿둑으로부터 9~12 km로 한정한 상태에서 해수유입이 시행됨에 따라 상대적으로 오차가 크게 나타날 가능성이 높은 저유량이 많이 포함된 결과임을 고려할 때, 해수유입량 산정공식이 낙동강하굿둑만의 수리적, 구조적인 특성을 적절하게 반영하였다고 판단된다.

5. 결 론

2021년에 시행된 낙동강하굿둑 시범개방은 지속 가능한 낙동강 하구 기수역 조성을 목표로 제반 여건에 대한 data 수집을 위해 시행되었다. 해수유입량 결정은 적절한 범위의 기수역 조성과 과도한 해수유입으로 야기될 수 있는 염해 피해를 방



(a) Overflow (up) and Underflow (down)



(b) Overflow + Underflow

Fig. 10. Comparison of measured and calculated discharge

지하기 위한 의사결정의 시작지점으로서, 본 연구에서는 이론적이고 실측 data기반의 낙동강하굿둑 해수유입량 식을 제안하였다. 낙동강하굿둑 수문의 구조적 특성과 해수-담수 밀도차를 유량공식에 반영하기 위하여 주요 가정을 전제한 β를 설정하여 낙동강하굿둑 조위 보정식을 제시하였다. 2021년 8번의 대조기 동안 ADCP를 이용한 해수유입량을 실측하여, 유량계수에 대한 회귀식을 제시하였다. 유량계수를 적용하여 완성된 낙동강하굿둑 해수유입량 산정식은 월류 및 저류에서 모두 3% 내외의 정확도를 확인할 수 있었다. 이 해수유입량 산정식은 2022년 낙동강하굿둑의 실제 운영 및 의사결정에 사용 중이며, 향후 낙동강 하구 기수역 조성과 관련된 여러 연구에도 참고가 가능할 것으로 생각된다. 다만, 시범운영 과정에서 시기별·계절별로 동일 수위 및 개도 조건임에도 산정식과 실측값에 차이가 나타나기도 하였다. 이러한 오차를 최소화하기 위해서는 하굿둑 수문 주변에 대한 수온, 염분측정을 보완하여 유량 변화에 영향을 미칠 수 있는 인자들에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 향후 낙동강하굿둑 수문 내·외측에 염분도계를 설치할 예정이며, 이로부터 실측된 염분 data를 이용하여 현재 제시된 해수유입량 산정식의 정확도를 개선이 가능할 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 "낙동강하굿둑 개방 영향조사 및 대책사업" 지원을 받아 수행되었습니다. 지원에 감사드립니다.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

Alhamid, A.A. (1999). "Analysis and formulation of flow through combined V-notch-gate-device." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 697-705.

Anderson, R.F. (1982). "Concentration, vertical flux, and remineralization of particulate urnjum in seawater." *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vol. 46, No. 7, pp. 1293-1299. doi: 10.1016/0016-7037(82)90013-8

Arvanaghi, H., and Oskuei, N.N. (2013). "Sharp-crested weir discharge coefficient." *Journal of Civil Engineering and Urbanism*, Vol. 3, No. 3, pp. 87-91.

Belaud, G., Cassan, L., and Baume, J.P. (2009). "Calcuation of contraction coefficient under sluice gates and application to discharge measurement." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 135, No. 12, pp. 1086-1091.

Bennett, J.P. (1976). "Calibration of branched estuary models." *Proceeding of 15th ICCE*, ASCE, Honolulu, HI, U.S., Vol. 3, pp. 3416-3434.

Bilhan, O., Emiroglu, E., and Miller, C.J. (2016). "Experimental investigation of discharge capacity of labyrinth weirs with and without nappe breakers." *World Journal Mechanics*, Vol. 6, pp. 207-221.

Caldwell, J.M. (1955). "Tidal currents at inlets in the Inited states." *Proceeding of American Society of Civil Engineers*, NY, U.S., Vol. 81, p. 716.

Chen, C.L. (1991). "Unified theory on power laws for flow resistance." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 3, pp. 371-389.

Clemmens, A.J. Stelkoff, T.S., and Replogle, J.A. (2003). "Calibration of submerged radial gates." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 129, No. 9, pp. 680-687.

Crookston, B.M., and Tullis, B.P. (2012). "Labyrinth weirs: Nappe interference and local submergence." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 138, No. 8, pp. 757-765.

Halliwell, A.R. (1967). "Tidal velocities across a partly-completed barrages." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 93, No. 5, pp. 85-95.

Henderson, F.M. (1966). *Open channel flow*, MacMillan, NY, U.S., pp. 174-176.

Henry, R. (1950). "Discussion to 'On submerged jets'." *Transactions of the American Society of Civel Engineers*, Vol. 115, pp. 687-694.

Kandaswamy, P.K., Rajaratnam, N., and Anand, T.R. (1959). "Discussion of "Calibration of a submerged broad crested weirs"." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 85, No. 9, pp. 119-124. doi: 10.1061/JYCEAJ.0000343

Kreeke, J.V. (1967). "Water level fluctuations and flow in tidal inlets." *Journal of Waterway*, ASCE, Vol. 93, No. 4, pp. 97-106.

Mayor-Mora, R. (1975). "Hydraulics of tidal on sandy coast." *Journal of Cooastal Engnieering*, No. 14, pp. 1524-1545. doi: 10.9753/icce.v14.89

O'Brien, M.P., and Clark, B.R. (1975). "Hydraulic constants of tidal entrances." *14th International Conference on Coastal Engineering*, ASCE, Copenhagen, Denmark, Vol. 2, pp. 1546-1565.

Robertson, J.A., Cassidy, J.J., and Chaudhry, M.H. (1988). *Hydraulic engineering*, Houghton Mittlin, Boston, MA, U.S.

Shayan, H.K., and Farhoui, J. (2014). "Estimation of flow discharge under the sluice and radial gates based on contraction coefficient." *IJST Transactions of Civil Engineering*, Vol. 38, No. C2, pp. 449-463.

Simon, A.L. (1987). *Hydraulics 3rd ed*. John Wiley & Sons, New York, U.S., pp. 364-370.

Simpson, M.R., and Oltmann, R.N. (1990). "Acoustic doppler discharge-measurement system." *Hydraulic Engineering-proceedings of*

the 1990 National Conference, ASCE, San Diego, CA, U.S., pp. 903-908.

Smith, R.A. (1959). "Calibration of submerged broad crested weir." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 85, No. 3, pp. 1-16.

Song, J.W., Lee, J.E., and Im, J.H. (2009). "Estimation of discharge coefficient for triangle shape labyrinth weir." *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 9, No. 2, pp. 87-93.

Swamee, P. (1992). "Sluice gate discharge equations." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, ASCE, Vol. 118, No. 1, pp. 56-60.

Tullis, B.P. (2011). "Behavior of submerged ogee crest weir discharge coefficients." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 137, No. 10, pp. 677-681.

Tullis, B.P., and Neilson, J. (2008). "Performance of submerged ogee-crest weir head-discharge relationships." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 134, No. 4, pp. 486-491.

Tullis, B.P., Young, J.C. and Chandler, M.A. (2007). "Head-discharge relationships for submerged labyrinth weirs." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol.133, No.3, pp. 248-254.

Villemonte, J.R. (1947). "Submerged weir discharge studies." *Engineering News Record*, Vol. 139, No. 26, pp. 54-56.

Wahl, T.L. (2005). "Refined energy correction for calibration of submerged radial gates." *Journal of Irrigation and Drainage Engineering,* ASCE, Vol. 131, No. 6, pp. 457-466.