



Estimating Nakdong Estuary Barrage outflow using upstream hydrograph

Shim, Kyuhyun^a · Jung, Hahn Chul^{b*} · Hwang, Do-hyun^c · Kim, Daesun^d

^aResearcher, Korea Ocean Satellite Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea

^bAssociate Professor, Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

^cResearcher, Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul, Korea

^dSenior Researcher, Ocean Policy Institute Center, Korea Institute of Ocean Science and Technology, Busan, Korea

Paper number: 22-122

Received: 13 December 2022; Revised: 10 January 2023; Accepted: 11 January 2023

Abstract

The Nakdong Estuary Barrage is a tidal river environment where freshwater and seawater meet. This requires systematic monitoring of both surface water discharged from the estuary barrage and submarine groundwater discharge. In this study, upstream hydrograph and water balance analysis were used to calculate the change in water storage and discharge of the Nakdong Estuary Barrage. Submarine groundwater discharge was also calculated based on remote sensing-based digital elevation model data and hydrological modeling data, and compared with the estimated surface water discharge for analysis. Our proposed method can be efficiently applied to water resource management by utilizing remote sensing-based altimeter data other than field measurement. Because submarine groundwater discharge plays a significant role on the coastal environment as well as surface water discharge from an estuary barrage, studies on groundwater-surface water interactions in a river estuary should be sufficiently considered in monitoring the ecosystem of the Nakdong Estuary Barrage.

Keywords: Nakdong river, Storage change, Outflow, Submarine groundwater discharge

상류 수위를 활용한 낙동강 하구둑 유출량 추정

심규현^a · 정한철^{b*} · 황도현^c · 김대선^d

^a한국해양과학기술원 해양위성센터 연구원, ^b연세대학교 지구시스템학과 부교수, ^c연세대학교 지구시스템학과 연구원,

^d한국해양과학기술원 해양정책연구소 선임연구원

요지

낙동강 하구둑은 담수와 해수가 만나는 감조하천 환경으로 하구둑에서 방류하는 지표수 유출량과 연안 해저 지하수 유출량에 대한 모니터링이 체계적으로 요구된다. 본 연구에서는 낙동강 하구둑 상류 지역에 위치한 수위자료와 물수지분석을 통하여 변화 저수량과 방류량을 계산하였다. 해저를 통한 육상에서의 지하수 유출도 원격탐사 기반 지형자료와 수문 모델링 자료를 근거로 산출하여 낙동강 하구둑 유출량과 비교 분석하였다. 제안된 방법은 현장 측정 이외의 원격탐사 기반 고도계 자료를 활용하여 수자원 관리에 효율적으로 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 담수 지표수 유출량 뿐만 아니라 해저 지하수 유출이 연안에 미치는 영향이 크기 때문에, 낙동강 하구둑 생태계 모니터링에서 담수와 해수의 상호 관계에 대한 연구도 충분히 고려되어야 할 것으로 사료된다.

핵심용어: 낙동강, 변화저수량, 유출량, 해저지하수유출

*Corresponding Author. Tel: +82-51-664-3135

E-mail: hahnchul.jung@kiost.ac.kr (Jung, Hahn Chul)

1. 서론

오랜기간 동안 전지구 물순환에 관해서 많은 연구들이 수행되어 왔으나 대부분의 연구에서 배수의 영향과 시공간적인 저수량의 변동이 고려되지 않은 단순화된 방법을 통해 하천과 저수지의 저수량 정량화와 운영이 이루어지고 있다(Getirana *et al.*, 2020; Döll *et al.*, 2009; Yassin *et al.*, 2019).

하지만 해수와 담수가 만나는 감조부에서는 지형학적인 요소에 의해서도 유체가 전혀 다른 양상을 보이기도 한다. 감조 하천에서의 유출 특성을 평가하기 위한 연구는 수문학적 관점에서 많은 연구가 되어 왔으나 감조부에서 나타나는 현상을 고려한 연구는 아직 많이 부족하고 변동 특성을 파악하기에 많은 어려움이 따른다(Shin *et al.*, 2009).

우리나라 대표적인 하구역인 낙동강 하구는 담수와 해수가 만나는 지역으로 상호작용이 활발하여 조위의 영향으로 하천 수위의 낙폭이 크고 하구 유량의 흐름 특성이 다르기 때문에 일반하천보다 매우 복잡하게 거동한다(Lim, 2010). 특히 1987년 낙동강 하구둑이 운영된 이래로 해수 유입이 억제되면서 조류에 의한 영향보다 인위적인 조작이 담수와 해수에 보다 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(Park *et al.*, 2008).

일반적으로 육상에서 해양으로 물질수송은 눈에 보이는 하천을 통해서 이루어 진다고 생각하고 있지만 해저를 통한 지하수 유출이 물질 수송에 있어 하천 유출량 못지않는 중요한 역할을 하고 있다. 그만큼 육상에서 해양으로 유출되는 물의 양은 하천 뿐만 아니라 지하수 유출을 고려하여야 한다(Kim *et al.*, 2005).

Camenen *et al.* (2020)은 베트남 사이공강의 방류량은 조석의 영향을 크게 받고 있으며, Manning Strickler 식에서 채택된 Stage-Fall-Discharge (SFD) 곡선을 기반으로 하여 방류

량을 평가하였으며, Bourgault and Matte (2019)는 2개의 조위관측소의 수위측정만으로 조석의 영향을 받는 캐나다의 세인트로렌스 강의 유출량 변동성을 3% 이내로 재현이 가능한 모델을 제안하였다. 하지만 보 또는 댐과 같이 인위적인 조작이 필요한 경우 일반적인 하천유출 모형으로는 수문 내부에 도달하는 하천 유량만 산정하기 때문에 수문 외부의 해역환경에 영향을 미치는 하천 유출량을 적용하기에는 많은 오차가 보이는 것은 사실이다.

현재 낙동강 하구둑 저수량은 하천정비 기본계획 단면을 활용하여 1차원해석을 통한 하류 수위변화에 따른 저수량을 단순화한 수위-저수용적곡선을 생성하여 운영하고 있다. 유입량은 일반적으로 변화 저수량과 유출량을 이용하는 방법과 저수지로 유입하는 저수지 직상류부 하천의 유량 측정치로부터 추정하는 방법이 있다. 우리나라에서는 한국수자원공사에서 제공하는 저수량 변화에서 유출량을 더한 유입량 값을 이용하고 있으며, 음(-)의 값으로 나오는 경우 0으로 환산하여 활용하고 있다. Park *et al.* (2001)은 저수지 외 가장 가까운 하천의 관측소를 활용하여 저수지 유입량을 산정하는 개선법을 제안하였다. Getirana *et al.* (2020), Zhang *et al.* (2006)은 저수지 운영의 대안으로 위성 기반 고도계 데이터를 활용한 체계 설계를 제안하면서 자연적 과정보다는 저수지 운영 모듈을 통해 운영에 대해 알려주기 때문에 고도를 활용한 물수지 및 유출량을 충분히 추정할 수 있을 것으로 보인다.

본 연구에서는 낙동강 하구둑 상류 약 12km에 위치한 부산시(구포대교) 관측소의 수위(H)를 활용하여 물수지 분석에 의한 유출량을 추정하고 검증을 수행하였다(Fig. 1). 또한 해저를 통한 육상에서의 지하수 유출도 원격탐사 기반 지형자료와 수문 모델링 자료를 근거로 산출하여 낙동강 하구둑 유출량

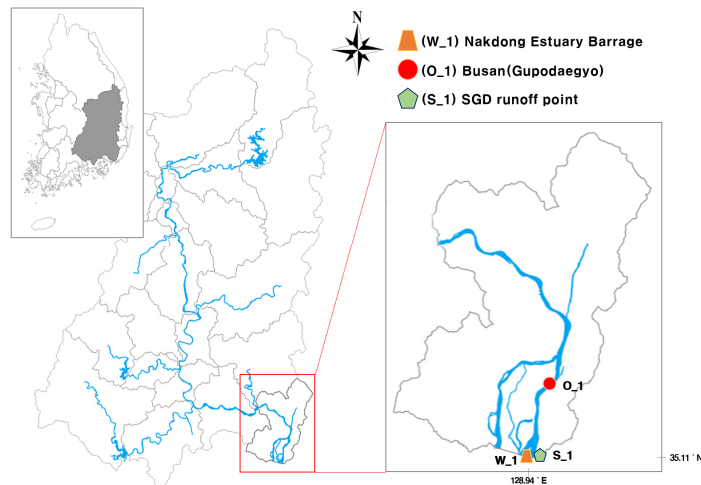


Fig. 1. Study area (Nakdong River Basin)

과 비교, 검토하였다. 저수지 운영정보가 필요 없이 상류 대표 관측점으로부터 유출량을 산정하는 실용화 방법을 제안하여 효율적 수자원 관리 방안과 원격탐사 자료의 활용으로 유출량 추정 가능성도 충분히 고려해볼 수 있을 것으로 사료된다.

2. 연구방법

2.1 낙동강하구둑 현황 및 운영

낙동강 하구둑은 1987년 11월에 완공되었으며, 하류부 인근 동남 해안권의 산업도시와 김해평야에 염분 피해 없는 안정된 용수공급과 치수를 목적으로 건설되었다(Park et al., 2008). 하구둑은 안동댐으로부터 355 km 을숙도 대교로부터 상류 3 km에 위치하며, 유역면적은 23,690 km²로 남한면적의 23.8%를 차지하고 있다. 낙동강 하구둑의 총연장은 2,230 m이며, 좌안배수문 510 m (47.5 m × 10문), 우안배수문 343 m (95.0 m × 1문, 47.5 m × 4문), 우안수문부 양쪽벽에 설치된 어도와 좌안 수문부 우측에 어선의 통행을 위한 갑문으로 구성되어 있다. 하구둑 운영은 해수의 염분이 상류로 침투하는 것을 차단하기 위해 상·하류 수위차가 0.2 m 이하일 경우 좌안과 우안 배수문을 폐쇄한다(Park et al., 2008). 하천수 방류에 좌안배수문과 우안배수문이 주로 사용되며, 평상시 수문운영 범위는 상류 수위 EL.0.51 m~EL.1.01 m 안에서 상류수위가 하류수위보다 0.2 m 이상일 경우 수문을 개방한다. 낙동강 하구둑의 홍수시 수문운영 패턴은 창녕함안보의 통과유량별 수문을 개방하여 피해를 최소화하고 있다(Gwon, 2009; Park et al., 2008). 1단계 창녕함안보 통과유량이 1,200 m³/s를 초과하면 좌안배수문 전수문을 개방하고, 2단계 통과유량이 14,500 m³/s를 초과하면 우안배수문 주수문 개방, 3단계 통과유량 16,800 m³/s 초과시 좌·우안 전수문을 개방하고 있다.

저수용량은 하구둑에서 창녕·함안보까지 약 76 km구간에 대해서 하천기본계획 단면을 이용한 홍수추적을 통해 하류 수위에 따른 수위-저수용량 곡선식을 생성하여 운영되고 있다. 유출량은 댐 또는 보 설계에서 동일한 방법인 설계시 만든 조건표와 외부 인자를 고려하여 계산하고 있으며, 유입량은 변화 저수량과 유출량을 더한 값을 반영하고 있다.

2.2 Mass balance

Fig. 2는 낙동강 하구둑 지점의 유입량(Q_{IN}), 유출량(Q_{OUT}), 저수량(S)의 시자료를 일 평균값으로 계산하여 그래프를 나타내었다. 본 연구에서 활용된 일 데이터는 하루 중 23시에 관측된 값이 반영되고 있어 자료의 신뢰성이 시자료를 활용하는

것이 높다고 판단되어 시자료의 평균을 적용하였다.

낙동강 하구둑에서 상류 12.280 km에 위치한 부산시(구포대교) 관측소는 감조하천의 영향을 직접적으로 받고 있으며, 하구둑까지의 도달시간이 짧다. 또한 흐름내에서 초음파의 도플러 변이를 이용한 유속측정방식(Acoustic Doppler Velocity Meter, ADVN)의 자동유량계가 설치되어 있어 감조하천에서 하천유량과 조위의 영향에 흐름을 파악할 수 있을 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 하구둑 내 수위를 활용한 물수지분석을 대신하여 부산시(구포대교) 관측소 수위를 활용하여 물수지 및 유출량을 산정하였다.

낙동강 하구둑 운영관리매뉴얼(K-water, 2015)에 의하면 저수지 설계용적을 근거로, 시간 당 부산시(구포대교) 0.01 m의 수위 증가는 약 130 m³/s의 유입량과 같다고 설명하고 있다. 하지만 현재 제공되고 있는 부산시(구포대교) 관측소의 수위 변화에 130 m³/s를 곱해 대입하면 매뉴얼에서 제시한 방법으로 나온 값과 관측값 간의 차이가 발생한다. 감조하천의 이점을 살려 유출시 영향을 최소화할 수 있는 간조에서 두 번째 간조가 발생하는 시기까지 1일로 지정하고 시작시간과 종료시간의 부산시(구포대교) 관측소의 수위차에 보정계수 130 m³/s를 곱하여 변화 저수량(ΔS^{EST})을 산정하였다.

저수지 유입량 산정 시 일반적으로 위에서 제시한 변화 저수량과 유출량을 이용하는 방법과 저수지로 유입하는 직상류부 하천의 유량 측정치로부터 추정하는 방법 두가지로 나뉜다. 하구둑 내수위에 의해 물수지가 이루어지고 있는 것을 고려하였을 때 직상류에 위치한 부산시(구포대교) 관측소의 유량을 활용하여 유입량 추정이 가능할 것으로 판단하고, 부산시(구포대교) 유량을 유입량(Q_i)으로 반영하였다. 낙동강

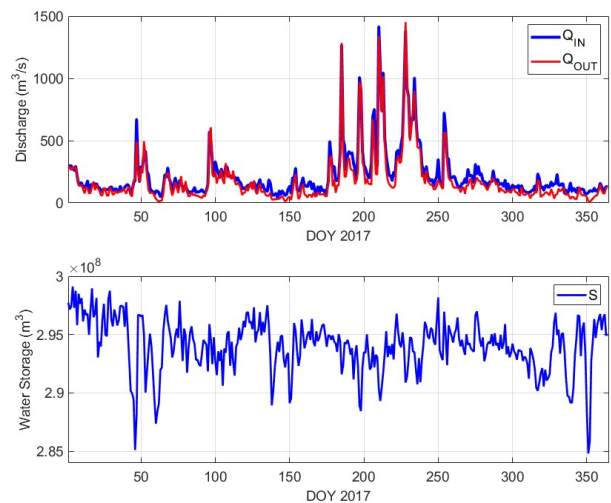


Fig. 2. Time series data inflow, outflow and storage (2017yr)

하구둑의 유출량(Q_o)은 Eq. (1)과 같이 주어진 유입량(Q_i)와 변화 저수량(ΔS) 비교하여 추정한다. Q_i 와 ΔS 는 위에서 설명한 방법을 적용하여 검증하고 H를 활용한 물수지에 미치는 상대적인 영향을 비교하였다(Bonnema *et al.*, 2016; Yoon *et al.*, 2016).

$$Q_o = Q_i - \Delta S \quad (1)$$

증발량과 지하수 침투는 저수지 유출에 기여하는 영향이 적기 때문에 주요 요인이 아닐 것으로 가정하였다.

2.3 SGD (Submarine Groundwater Discharge)

SGD는 연안 대수층에서 해안습지, 해변 및 대륙붕을 통해 해양으로 직접 방류되며 본 연구에서는 간접적 추정 방법인 물수지 접근법을 이용한 모델링을 통해 추정하였다. 이 추정 방법은 기여유역과 재충전 유역으로 구분하며, 지하수 흐름이 지표 흐름과 유사하다면 지하수를 해안으로 유입시키는 재충전 유역은 유출수가 해안으로 직접 유출된다. 각 연안유역에 대한 연간 SGD의 양(Q_{SGD})은 선형평균한 연간 순 재충전율(r) 또는 증발산손실에 대해 보정된 재충전량과 재충전 유역 면적(A)의 곱으로 계산된다(Eq. (2)). 재충전량은 LIS (Land Information System)에서 산출된 FLDAS (Famine Early Warning Systems Network Land Data Assimilation System)의 recharge 자료를 이용하였다(Kim and Jung, 2021; Sawyer *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2011).

$$Q_{SGD}(m^3/year) = r(m/year) \cdot A(m^2) \quad (2)$$

2.4 검증/오차분석

관측값과 예측값 사이의 통계적 적합도 분석을 위한 4가지 평가지표 R (Pearson Correlation), RMSE (Root Mean Square Error, 평균 제곱근 오차), NS (Nash-Sutcliffe), RE (Relative Error)를 사용하여 검증/오차 분석을 수행하였다.

$$R = \frac{\sum(OBS_t - \overline{OBS})(SIM_t - \overline{SIM})}{\sqrt{\sum(OBS_t - \overline{OBS})^2} \sqrt{\sum(SIM_t - \overline{SIM})^2}} \quad (3)$$

$$RE = \frac{\sum SIM - \sum OBS}{\sum OBS} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{(\sum(OBS_t - SIM_t)^2)/N} \quad (5)$$

$$NS = 1 - \frac{\sum(OBS_t - SIM_t)^2}{\sum(OBS_t - \overline{OBS})^2} \quad (\text{범위 : } -\infty \sim 1) \quad (6)$$

여기서, OBS_t , SIM_t 는 시간 t 일 때 관측값과 예측값, \overline{OBS} 와 \overline{SIM} 은 시계열 값의 평균을 나타낸다. R은 상관계수, RE는 상대오차이며, RMSE는 오류의 평균 크기를 측정하고 관측값과의 편차를 나타내는 것으로 관측값과 계산값과의 차이를 알려주는 일반적인 척도로 0에 가까울수록 오차가 적다. NS는 관측치들의 분산을 고려하여 계산하며, 음의 무한대($-\infty$)에서 1까지의 값을 가지고 1에 가까울수록 오차가 작음을 나타낸다. 0은 예측값과 관측값이 같다는 것을 의미하며, 0보다 작으면 예측오차가 관측치의 분산보다 크다는 것을 의미한다(Jung *et al.*, 2017; Getirana *et al.*, 2020).

3. 결과 및 토의

3.1 변화 저수량

변화 저수량 적용을 위해 2017년 1월 1일 간조때의 시간 04시부터 24시간(1일) 간격으로 기간을 분류하고 1일 주기의 시작시간과 종료시간의 부산시(구포대교) 수위차를 활용한 변화

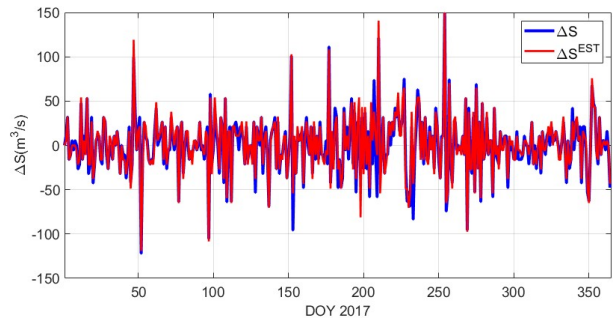


Fig. 3. Daily time series of storage change comparison

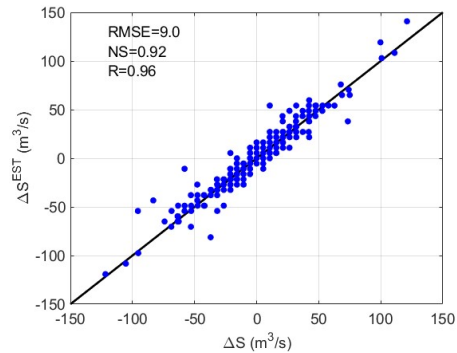


Fig. 4. Relationship between observed and estimated storage change

저수량 산정 결과(ΔS^{EST})와 관측값(ΔS)을 시계열로 Fig. 3에 나타내었다. 변화 저수량이 상승할 때에는 대체로 예측값이 잘 반영되고 있으며, 하강할 때에는 오차가 눈이 보이지만 변화 패턴은 유사하고 잘 반영하고 있는 것을 확인할 수 있었다. Fig. 4는 관측값과 예측값과의 관계와 오차 분석결과로 RMSE는 9.0, NS는 0.92, R은 0.96으로 관측값과 예측값의 정확도는 높게 나타났으며, 부산시(구포대교) 관측소 H가 변화 저수량을 대변할 수 있을 것으로 판단된다.

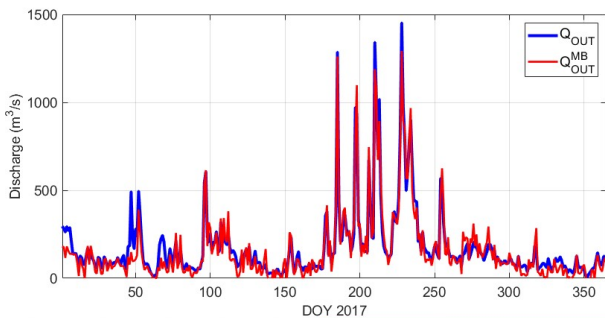


Fig. 5. Daily time series of outflow comparison

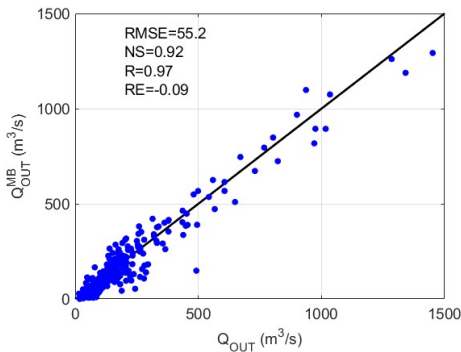


Fig. 6. Relationship between observed and estimated outflow values

3.2 유출량

3.1절에서 산정한 변화 저수량(ΔS^{EST}) 시계열과 구포대교 유량을 유입량(Q_i)을 활용하여 Eq. (1)의 식에 따라 산정한 유출량(Q_{OUT}^{MB})과 한국수자원공사에서 제공한 유출량(Q_{OUT})과 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 관측값과 추정값의 일변화를 보면 패턴이 상당히 잘 일치하고 있으며, 유출량이 급격히 증가하였을 때도 잘 반영되고 있었다. Fig. 6은 관측값과 예측값의 관계와 오차분석결과로 RMSE는 55.2를 보여주며, NS는 0.92, R은 0.97, RE는 -0.09로 모형의 정확도가 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과로부터 하구둑 인근 수위 관측 자료를 활용한 감조하천에서의 유출량 추정이 가능하다는 것을 보여준다. 추후 유출량에 대한 실측 없이도 수위관측소 수위 자료를 활용한 유출량 계산이 가능할 것으로 판단된다.

3.3 SGD와 유출량 비교

일반적으로 육상에서 기인한 생화학적 물질들이 해수로 유입되는 과정이 주로 하천을 통해 이루어지는 것으로 인식되어 가는 가시적 통로이며, 실제로는 해저 지하수 유출(SGD)이 더욱 중요한 역할을 하고 있다(Kim and Jung, 2021). Fig. 7은 한국수자원공사에서 제공중인 낙동강 하구둑에서 유출되는 양과 해저 지하수 유출량을 월별로 표현한 것이다. 2017년 총 하천 유출량은 5.53 km³/month, 낙동강권역 해저 지하수 유출량은 0.92 km³/month로 하천 유출량의 1/6의 양을 차지하였다. 강수가 많은 시기인 7, 8월에 하천 유출량과 지하수 유출량이 많았으며, 5, 6월의 경우 하천 유출량이 두드러지게 낮은 값을 보였는데 이는 농번기 농업용수의 활용으로 하천 유출량은 감소했지만 지하수를 통한 유출을 지속적으로 진행하고 있기 때문에 차이가 좁혀진 것으로 판단된다. 지하수 유출량은 해안 지역의 잠재 수자원으로 상당한 부분을 차지하고 있기 때문에(Han *et al.*, 2006) 낙동강 하구둑 생태계 모니터링에서 담수와 해수의 상호 관계에 대한 연구도 충분히 고려되어야

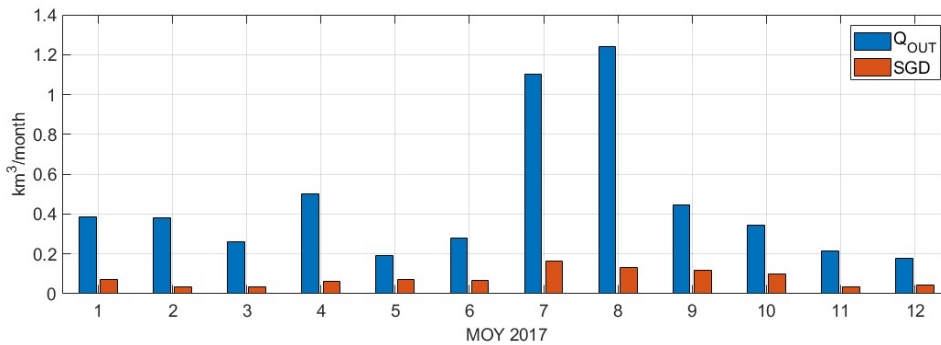


Fig. 7. Monthly SGD and outflow comparison

할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 낙동강 하구둑 상류 약 12 km 지점에 위치한 부산시(구포대교) 관측소의 수위를 활용하여 변화 저수량과 유출량을 산정하여 수자원공사에서 제공중인 관측값과 비교하였다. 감조하천에서 유출시 영향을 최소화할 수 있는 간조에서 두번째 발생하는 간조까지 1일로 지정하고 시작시간과 종료시간의 수위차와 변화 저수량의 관계를 분석하였다. 저수지 설계 용적을 근거로, 시간 당 부산시(구포대교) 수위 0.01 m당 평균 약 130 m³/s의 유량과 같으며, 적용 결과 관측값과 예측값의 경향성을 잘 표현하였으며, NS는 0.92, R은 0.96으로 높은 정확도를 보여주었다. 유출량은 유입량에서 변화 저수량은 뺀 값으로 부산시(구포대교) 관측소에서 제공 중인 유량을 유입량으로 반영하였으며, 감조하천에서 수위를 활용한 유출량 추정이 가능한 것을 보여주었다. 본 연구에서 제안한 대표성을 갖는 하나의 관측점으로 보 운영 등에 대한 추가 정보가 없어도 변화 저수량과 유출량 예측이 가능한 만큼 위성 기반 고도계 센서를 활용하여 수면 고도 측정을 통해 유출량 추정도 충분히 고려해 볼 수 있을 것으로 보인다.

간접적 추정 방법인 물수지 접근법을 이용한 모델링을 통해 SGD 추정결과와 낙동강 하구둑으로 유출되는 양을 비교하였다. 2017년 총 하천 유출량은 5.53 km³/month, 낙동강권역 해저 지하수 유출량은 0.92 km³/month로 하천 유출량의 1/6의 양을 차지하고 있다. 지표수 유출량 뿐만 아니라 해저 지하수 유출이 연안에 미치는 영향이 크기 때문에, 통합 물 관리 측면에서도 담수와 해수의 상호 관계에 대한 연구도 충분히 고려되어야 한다.

감사의 글

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1A2C100578011)

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

- Bonnema, M., Sikder, S., Miao, Y., Chen, X., Hossain, F., Ara Pervin, I., Mahbubur Rahman, S.M., and Lee, H. (2016). "Understanding satellite-based monthly-to-seasonal reservoir outflow estimation as a function of hydrologic controls." *Water Resources Research*, Vol. 52, pp. 4095-4115.
- Bourgault, D., and Matte, P. (2019). "A physically-based method for real-time monitoring of tidal river discharges from water level observations, with an application to the St. Lawrence River." *Journal of Geophysical Research: Oceans*, Vol. 125, 5.
- Camenen, B., Gratiot, N., Cohard, J. -A., Gard, F., Tran, V.Q., Nguyen, A.-T., Dramais, G., van Emmerik, T., and Nemery, J. (2020). "Monitoring discharge in a tidal river using water level observation: application to the Saigon River." *Vietnam, Science of the Total Environment*, Vol. 761, 143195.
- Döll, P., Fiedler, K., and Zhang, J. (2009). "Global-scale analysis of river flow alterations due to water withdrawals and reservoirs." *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 13, pp. 2413-2432.
- Getirana, A., Jung, H.C., Hoek, J.V.D., and Ndehedehe, C.E. (2020). "Hydropower dam operation strongly controls Lake Victoria's freshwater storage variability." *Science of the Total Environment*, Vol. 726, 138343.
- Gwon, W.M. (2009). *Hydrologic case study for efficient operation and management of Nakdong-River Estuary Barrage*, Master Thesis, KyungNam University.
- Han, S.Y., Hong, S.H., and Park, N. (2006). "Distribution of coastal ground water discharge from surficial aquifers of major river districts." *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol. 26, No. 1B, pp. 1-6.
- Jung, H.C., Getirana, A., Policelli, F., McNally, A., Arsenault, K.R., Kumar, S., Tadesse, T., and Pters-Lidard, C.D. (2017). "Upper Blue Nile basin water budget from a multi-model perspective." *Journal of Hydrology*, Vol. 555, pp. 535-546.
- Kim, D.S., and Jung, H.C. (2021). "The characteristics of submarine groundwater discharge in the coastal area of Nakdong River Basin." *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 37, No. 6-1, pp. 1589-1597.
- Kim, G., Ryu, J.W., Yang, H.S., and Yun, S.T. (2005). "Submarine groundwater discharge (SGD) into the yellow sea revealed by 228Ra and 226Ra isotopes: Implications for global silicate fluxes." *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 237, pp. 156-166.
- K-water (2015). *Korea water resources corporation*. pp. 46-47.
- Lee, H., Shum, C., Tseng, K.-H., Guo, J.-Y., and Kuo, C.-Y. (2011). "Present-day lake level variation from Envisat altimetry over the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: Links with precipitation and temperature." *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, Vol. 22, pp. 169-175.
- Lim, S.P. (2010). *A study on the hydraulic characteristic and sediment property in the Nakdong River Estuary*. Master Thesis, Pukyong

National University.

- Park, R.H., Yang, J.R., and Yoon, J.H. (2001). "Improvement of inflow calculation method in reservoir." *Journal of Civil and Environmental Engineering Research*, Vol. 21, No. 4, pp. 335-346.
- Park, S., Yoon, H.S., Lee, I.C., and Kim, H.T. (2008). "Correlation between meteorological factors and water discharge from the Nakdong River Barrage, Korea." *Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety*, Vol. 14, No. 2, pp. 111-117.
- Sawyer, A.H., Dabid, C.H., and Famiglietti, J.S. (2016). "Continental patterns of submarine groundwater discharge reveal coastal vulnerabilities." *Science*, Vol. 353, No. 6300, pp. 705-707.
- Shin, H.H., Hwang, M.H., Kang, S.U., and Lee, S.J. (2009). "Analysis on Hydraulic Characteristics in Nakdong Estuary Barrage." *Proceedings of the Korea Water Resources Association Conference*, KWRA, pp. 764-769.
- Yassin, F., Razavi, S., Elshamy, M., Davison, Sapriza-Azuri, B., G., and Wheater, H. (2019). "Representation and improved parameterization of reservoir operation in hydrological and land-surface models." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 23, pp. 3735-3764.
- Yoon, Y., Beighley, E., Lee, H., and Pavelsky, T. (2016). "Estimating flood discharges in reservoir-refulated river basins by integrating synthetic SWOT satellite observations and hydrologic modeling." *Journal of Hydrologic Engineering*, Vol. 21, No. 4, 05015030.
- Zhang, J., Xu, K., Yang, Y., Qi, L., Hayashi, S., and Watanabe, M. (2006). "Measuring water storage fluctuations in lake dongting, China, by topex/poseidon satellite altimetry." *Environmental Monitoring and Assessment*, Vol. 115, pp. 23-37.
- Zhou, Y.Q., Befus, K.M., Sawyer, A.H., and David, C.H. (2018). "Opportunities and challenges in computing fresh groundwater discharge to continental coastlines: A multimodel comparison for the United States Gulf and Atlantic Coasts." *Water Resources Research*, Vol. 54, pp. 8363-8380.