



## Analysis on the sediment sluicing efficiency by variation of operation water surface elevation at flood season

Jeong, Anchul<sup>a</sup> · Kim, Seongwon<sup>a</sup> · Kim, Minseok<sup>b</sup> · Jung, Kwansue<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>Department of Civil Engineering, Chungnam National University

<sup>b</sup>International Water Resources Research Institute, Chungnam National University

Paper number: 16-082

Received: 20 September 2016; Revised: 3 November 2016; Accepted: 3 November 2016

### Abstract

In general, efficient operation of sediment sluicing is important in economical aspect. In this study, the efficiency of sediment sluicing by various operation at water surface elevation on multi-functional weirs were analyzed using Nays2DH, and we focused on the Dalsung weir at Nakdong river. The results of this study shows that, the same number of flushing channels and water gates were developed due to sediment sluicing, and sediment deposition occurred in upstream region of flushing channels. Also, the sediment sluicing efficiency increased by approximately 4.6% and sedimentation decreased by approximately 4.5% at EL. 14.5 m for operations on water surface elevation exceeding EL. 14.0 m. The mitigation of reservoir sedimentation and extension of maintenance dredging period are possible if the variation of sediment sluicing efficiency in various operation at water surface elevation during flood season are considered.

**Keywords:** Sediment Sluicing, Riverbed-Level Variation, Multi-Functional Weir, Nays2DH

## 홍수기 운영수위 변화에 따른 배사 효율 분석

정안철<sup>a</sup> · 김성원<sup>a</sup> · 김민석<sup>b</sup> · 정관수<sup>a\*</sup>

<sup>a</sup>충남대학교 공과대학 토목공학과, <sup>b</sup>충남대학교 국제수자원연구소

### 요 지

일반적으로 배사에 비해서 준설은 경제적 부담이 크기 때문에 배사를 효율적으로 운영하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 2차원 하상변동 모형인 Nays2DH를 이용하여 홍수기 운영수위에 따른 배사효율을 낙동강에 위치한 달성보를 중심으로 분석하였다. 분석결과, 가동보의 수 만큼 배사 수로가 형성되었으며, 배사수로 상류에는 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 또한, 홍수기 운영수위를 EL. 14.5 m로 운영하는 것이 EL. 14.0 m로 운영하는 것에 비해서 배사효율이 약 4.6% 증가하여 퇴사가 약 4.5% 감소하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 분석한 홍수기 운영수위에 따른 배사효율의 변화를 고려한다면, 저수지 퇴사 저감 및 준설주기의 장기화가 가능할 것으로 판단된다.

**핵심용어:** 배사, 하상변동, 다기능보, Nays2DH

### 1. 서론

보와 같이 하천을 횡단하는 수공구조물은 수위 및 유량 조절할 수 있다는 장점이 있는 반면, 유사이송의 연속성을 차단하여 저수지 퇴사현상을 유발하는 단점이 있다(Jeong and

Jung, 2015). 저수지 퇴사현상은 저수용량 감소, 홍수위 증가, 구조물 안정성 약화 등의 문제로 이어지기 때문에 지속적인 유사관리가 이루어져야 한다.

저수지의 유사관리를 위한 대책은 유역에서 발생하는 유사를 감소시키는 방법과 하천에서 유사퇴적을 최소화하는 방법, 저수지의 용량회복을 위한 방법으로 구분된다(Kondolf et al., 2014). 이 중에서 하천에서 유사퇴적을 최소화하는 방

\*Corresponding Author. Tel: +82-42-821-5675  
E-mail: ksjung@cnu.ac.kr (K. Jung)

법에는 퇴적이 유발될 수 있는 지역에서 유사이송의 연속성을 확보할 수 있도록 유사를 우회 및 통과시키는 방법으로 유사 우회(sediment bypass)와 유사통과(sediment pass-through)로 구분된다. 저수지 용량회복을 위한 방법은 크게 기계적 준설(mechanical excavation)과 수리학적 준설(hydraulic excavation)로 구분된다. 기계적 준설이 일반적인 준설(dredging)이라고 한다면, 수리학적 준설은 배사(sediment flushing)라고 할 수 있다(Fig. 1).

유사우회의 경우에는 우회를 할 수 있는 수로가 존재해야 하고, 수리학적 준설은 강제적인 수위강하가 필요하다. 국내의 다기능보 중에서 우회수로를 함께 건설한 다기능보는 존재하지 않으며, 유량확보를 목적으로 건설된 다기능보의 수위강하는 건설목적과 상반되기 때문에 유사우회 및 수리학적 준설은 적용하기에는 어려움이 있다. 또한, 수리학적 준설의 경우에는 하폭이 큰 지역에서는 배사수로(flushing channel)를 형성하여 배사효율이 낮아지게 되는 이유로 인해서, 하폭이 좁은 지역에서 상대적으로 유리하다(Shen, 1999). 국내 다기능보와 같은 하폭이 큰 분류에 설치된 상황에서 높은 배사효율을 기대하기 어렵다. 따라서 국내 다기능보의 유사관리를 위해서는 하천에서 유사퇴적을 최소화하는 유사통과와 저수지 용량회복 방법인 기계적 준설이 적용될 수 있을 것으로 보인다. 두 가지 방법 모두 고탁도를 유발하는 단점이 존재하지만, 이 중에서 준설은 유사통과에 비해서 경제적으로 불리하며, 사회·환경적인 측면에서 부정적인 영향이 큰 편이다

(Jeong et al., 2015). 따라서 국내 다기능보의 효율적인 유사관리를 위해서는 유사통과를 효율적으로 운영하여 준설주기를 장기적으로 설정하도록 하는 것이 중요하다.

유사통과의 대표적인 방법 중 하나인 sluicing은 홍수기와 같이 많은 양의 유량이 저수지로 유입되는 시기에 유량과 함께 유사를 저수지 하류로 배제하는 방식이다(Kondolf et al., 2014). 많은 연구에서 flushing과 sluicing을 혼용하여 사용하였으나, Kondolf et al. (2014)은 두 용어의 차이점에 대해서 명확하게 구분하여 정의하였다. 국내의 연구에서도 두 용어를 배사로 정의하여 사용하고 있으며, 본 연구에서 사용하는 배사라는 용어는 sluicing을 의미한다.

배사에 관한 최근 연구로 Hajiabadi and Zarghami (2014)는 이란에 위치하고 있는 Sefidrud 저수지의 주목적인 용수공급과 전력생산을 최적으로 하기 위한 최적화모형을 개발하였다. 최적화모형에서는 용수공급과 전력생산 뿐만 아니라 배사운영까지 목적함수에 반영하여 지속가능한 저수지 운영이 가능하도록 연구를 수행하였다. Noh et al. (2014)는 파키스탄 파트린스 저수지를 대상으로 퇴배사 모의를 수행하였다. 해당 저수지에는 배사문이 존재하여 배수문 운영에 의한 배사효과를 분석하였으며, 이를 위해서 EFDC 모형을 이용하였다. 파트린스 저수지에서 5년간 배사를 수행하지 않았을 경우에 포착율이 약 50%인 반면, 최대유량이 발생한 직후 5일간 배사를 실시하면 포착율이 약 31.4%까지 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 저수지의 용량회복을 위해 배사는 매우 효율적인

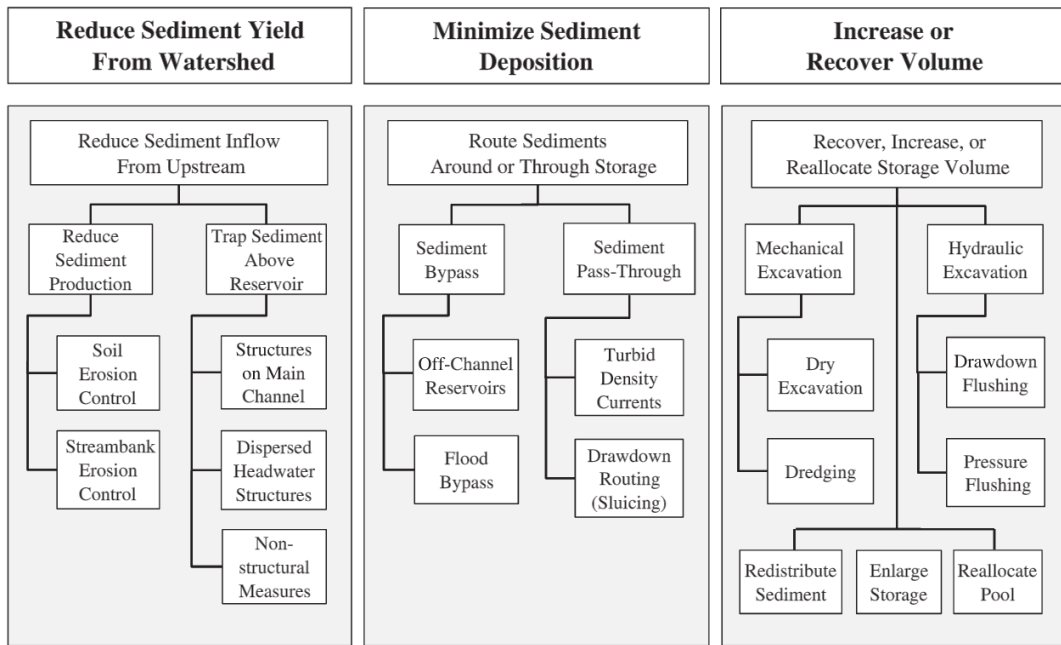


Fig. 1. Classification of strategies for sediment management (Kondolf et al., 2014)

방법 중 하나라고 할 수 있다. Ahn et al. (2013)은 1차원 하상변동 모형인 GSTARS를 이용하여 Lewis 와 Clark 저수지의 배사를 모의하였다. 20년 동안 측정된 자료를 통하여 모형을 검보정하고, 시나리오별 배사효율을 분석하였다. Choi and Choi (2012)는 저수지 퇴·배사 모의를 위한 1차원 준정류 하상변동 모형을 개발하고, 기존연구에서 수행된 저수지 퇴사와 배사에 관한 실내실험 결과를 이용하여 모형을 검증하였다. Ji et al. (2011)은 낙동강 하구둑의 유지준설을 저감하기 위해서 배사운영에 대한 연구를 수행하였다. 해당연구에서는 배사 기간 및 유량에 따른 배사곡선을 개발하고, 1차원 준정류모형을 이용하여 5년간 모의한 결과 약 54%의 준설량을 배사로 해결할 수 있음을 보였다.

본 연구에서는 중소규모의 홍수사상에서 다기능보의 수위에 따른 배사 효율의 변화를 2차원 하상변동 모형인 Nays2DH를 이용하여 모의하였으며, 배사 효율을 최대화하는 홍수기 시 다기능보 관리 수위를 제시하였다.

## 2. 연구대상구간 및 모형의 개요

### 2.1 연구대상구간

다기능보의 배사 효율을 검토하여 최적 배사 시나리오를 도출하기 위해서 본 연구에서는 실제 유역을 선정하여 연구를 수행하였다. 이를 위해서 선정된 연구대상구간은 낙동강에 위치한 화원 수위관측소부터 달성보까지 약 16 km에 이르는

구간이다(Fig. 2). 해당 연구대상구간을 대상으로 모의함에 있어 상류단 경계조건은 화원 수위관측소, 하류단 경계조건은 달성보 위치에 부여하였다. 또한 연구대상구간내에 위치하고 있는 고령교 수위관측소의 관측자료를 이용하여 모형의 검보정을 수행하였다. 달성보의 연장은 580 m로, 라이징섹터 형식으로 건설된 3개의 수문으로 162 m 연장의 가동보를 구성하고 있으며, 고정보는 연장 418 m로 구성되어 있다. 관리 수위 및 상한수위는 각각 EL. 14.0 m와 EL. 14.5 m이며, 계획 홍수위는 EL. 22.72 m로 계획되어 운영되고 있다(K-water, 2012).

### 2.2 모형의 개요

다기능보의 배사효과를 검토하기 위해서 2차원 수심적분 모형인 Nays2DH를 이용하였다. Nays2DH는 직교좌표계를 일반좌표계로 좌표변환을 하여 사용하는 2차원 수심평균 모형으로 흐름 및 유사이송, 하상변동 등을 모의할 수 있으며, 이를 위한 지배방정식은 Eqs. (1)~(3)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{h}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{hu^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{hu^\eta}{J} \right) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\xi}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} + \alpha_1 u^\xi u^\xi + \alpha_2 u^\xi u^\eta + \alpha_3 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[ (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\xi_x \eta_x + \xi_y \eta_y) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ & - \left( C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h_v \right) \frac{u^\xi}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\xi \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u^\eta}{\partial t} + u^\xi \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} + u^\eta \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} + \alpha_4 u^\xi u^\xi + \alpha_5 u^\xi u^\eta + \alpha_6 u^\eta u^\eta = \\ & -g \left[ (\eta_x \xi_x + \eta_y \xi_y) \frac{\partial H}{\partial \xi} + (\eta_x^2 + \eta_y^2) \frac{\partial H}{\partial \eta} \right] \\ & - \left( C_f + \frac{1}{2} C_D a_s h_v \right) \frac{u^\eta}{hJ} \sqrt{(\eta_y u^\xi - \xi_y u^\eta)^2 + (-\eta_x u^\xi + \xi_x u^\eta)^2} + D^\eta \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,  $\xi$ 와  $\eta$ 는 일반좌표계의 공간좌표 성분,  $u^\xi$ ,  $u^\eta$ 는  $\xi$ 와  $\eta$  방향으로의 유속,  $H$ 는 수위,  $\xi_r$ ,  $\eta_r$ 는 일반좌표계에서 격자의 크기와 국소적인 격자의 크기 비율,  $C_f$ 는 하상전단계수,  $C_D$ 는 식생에 의한 항력계수,  $a_s$ 는 단위체적당 식생에 의해 차단되는 면적,  $h_v$ 는 수심과 식생 사이의 높이 차이,  $J$ 는 Jacobian,  $D^\xi$ ,  $D^\eta$ 는 확산항으로서 Eqs. (4)~(5)와 같이 간략식으로 표현되며,  $\alpha_n$ 은 Eqs. (6)~(11)과 같이 표현된다.

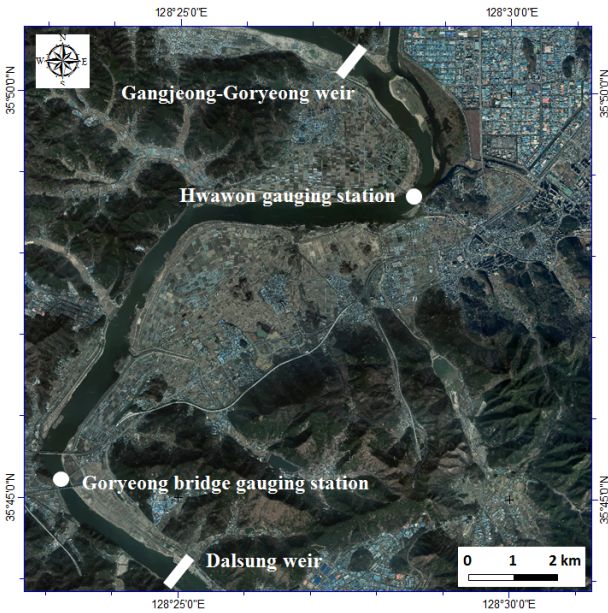


Fig. 2. Study area, Nakdong river basin

$$D^\xi \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \nu_i \xi_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \nu_i \eta_r^2 \frac{\partial u^\xi}{\partial \eta} \right) \tag{4}$$

$$D^\eta \simeq \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \nu_i \xi_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \xi} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \nu_i \eta_r^2 \frac{\partial u^\eta}{\partial \eta} \right) \tag{5}$$

$$\alpha_1 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} \tag{6}$$

$$\alpha_2 = 2 \left( \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right) \tag{7}$$

$$\alpha_3 = \xi_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \xi_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \tag{8}$$

$$\alpha_4 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi^2} \tag{9}$$

$$\alpha_5 = 2 \left( \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \xi \partial \eta} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \xi \partial \eta} \right) \tag{10}$$

$$\alpha_6 = \eta_x \frac{\partial^2 x}{\partial \eta^2} + \eta_y \frac{\partial^2 y}{\partial \eta^2} \tag{11}$$

이 때,  $\nu_i$ 는 와점성계수를 의미하며, Nays2DH에서는  $k-\epsilon$  모형 등을 이용하여 와점성계수를 산정할 수 있다(Shimizu et al., 2014). 하상변동 모의를 위해서 Eq. (12)와 같이 표현되는 2차원 유사의 연속방정식을 이용한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{z_b}{J} \right) + \frac{1}{1-\lambda} \left[ \frac{\partial}{\partial \xi} \left( \frac{q_b^\xi}{J} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{q_b^\eta}{J} \right) \right] = 0 \tag{12}$$

여기서,  $z_b$ 는 하상고,  $\lambda$ 는 하상재료의 공극률을 의미한다.  $q_b$ 는 윗첨자 방향으로의 단위폭당 소류사량을 나타낸다.

Kang et al. (2016)은 Nays2DH의 적용성 검증을 위하여 Cui et al. (2003)실내실험결과와 수치모의 조건을 동일하게 하여 모의를 수행하였다. Cui et al. (2003)의 실험은 토사가 토사터미(sediment pulse) 형태로 하천에 공급되었을 때, 토사터미가 흐름에 의해 하류로 확산되는 과정을 모의한 실험이다. Nays2DH를 이용하여 실험을 재현하였을 때, 토사터미 하류에 교호사주가 발달하였다가 소멸하고, 토사터미도 소멸되는 과정과 함께 하상고의 변화에 의한 수면형의 변화 과정 역시 잘 모의하는 것으로 나타났다. 또한, 소류사와 부유사이

송을 모두 효과적으로 모의하는 것으로 알려져 있으므로 (Nelson et al., 2016), 실제 하천에 적용하는데에는 무리가 없는 것으로 판단된다.

### 3. 배사 시나리오 수립 및 모형의 적용

#### 3.1 입력자료의 구축

Nays2DH를 이용하여 하상변동 모의하기 위해서 필요한 입력자료는 수리량 자료와 유사량 자료로 이루어지며, 수리량 자료는 하천지형자료, 조도계수, 수리량 경계조건으로 이루어진다. 유사량 자료는 유사량 경계조건, 하상토 입도분포 자료가 필요하다.

수리량 자료 중 하천지형자료와 유사량 자료 중 하상토 입도분포 자료는 2013년도에 이루어진 실측자료를 이용하였으며, 조도계수는 선행연구(Ku et al., 2015)를 통해서 제시된 0.023을 적용하였다. 수리량 경계조건은 화원 수위관측소의 유량과 달성보의 수위를 상·하류단 경계조건으로 사용하였다. 상류단의 유사량 경계조건은 상류단 유량 경계조건과 유사이송능력 공식을 이용하여 산정하여 상류단 유사량 경계조건으로 사용하는 평형 유사이송 조건을 이용하였다.

또한, 달성보의 고정보와 가동보를 형상화하기 위해서 달성보의 가동보 폭이 40 m인 것을 감안하여 격자를 20 m의 정사각형 형태로 구성하였다. 모의를 위해서 계산된 격자망 수는  $751(I) \times 77(J) = 57,827$ 개이다.

#### 3.2 모형의 검·보정

하상변동 모형의 검·보정은 고정상(fixed bed) 모형과 이동상(movable bed) 모형에 대한 검·보정으로 구분된다. 고정상 모형의 검·보정은 물과 접촉하는 경계면을 구성하는 수로 재료가 흐름에 의해 움직이지 않고 고정된 수로에 대한 검·보정을 의미하며, 이동상 모형의 검·보정은 고정상 모형과 상이하계 수로 재료가 흐름에 의해서 움직이는 수로에 대한 모형의 검·보정을 의미한다(Woo, 2004). 일반적으로 고정상 모형에서는 조도계수 등이 검·보정의 대상이 되며, 이동상 수로에서는 유사이송능력 공식이 검·보정 대상이 된다. 본 연구에서는 고정상 모형과 이동상 모형의 검·보정을 실제 수문사상과 현장측정 자료를 이용하여 수행하였다.

고정상 모형의 검·보정을 위하여 2016년 7월에 발생한 집중호우시 수문사상을 이용하였다. 모형의 상류단 경계조건은 화원관측소의 유량을 이용하였으며, 하류단 경계조건은 달성보 수위를 이용하였다. 2016년 7월 4일 12시에서 2016년

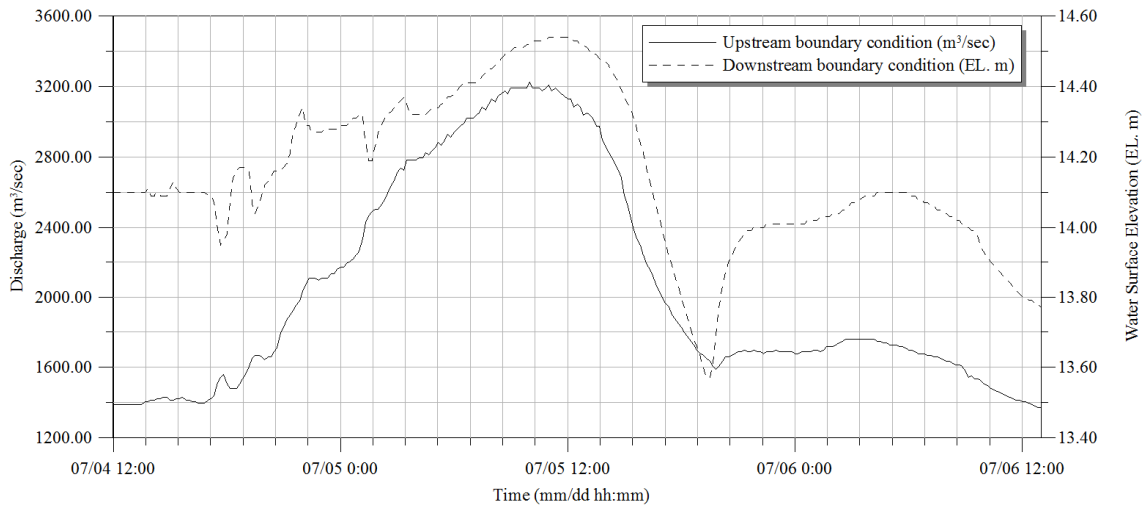


Fig. 3. Boundary conditions for model verification

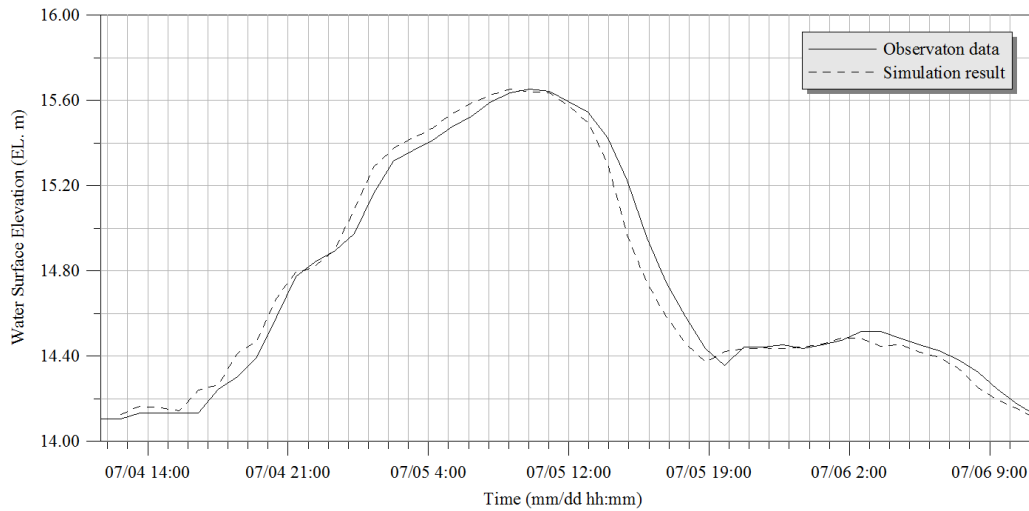


Fig. 4. Verification results of water surface elevation at Goryeong bridge gauging station

Table 1. Statistical indices for evaluating model accuracy (Krause et al., 2005; Yu et al., 2016)

Statistical index	Equation	Desired value
$R^2$ (R-square)	$R^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$	1
$RMSE$ (Roots Mean Square Error)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{N}}$	0
$NSE$ (Nash-Sutcliffe Efficiency)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$	1

7월 6일 13시까지 첨두홍수량이 발생한 시점을 중심으로 총 49시간 동안의 부정류 모의를 수행하였으며, 상하류 경계조건은 Fig. 3과 같다. 부정류 모의 결과를 고령교 수위관측소에서 관측된 수위와 비교를 Table 1에서 제시한 모형의 정확성 평가 방안을 이용하여 고정상에 대한 모형 검증을 수행하였다. Table 1에서  $N$ 은 자료의 개수를 의미하며,  $O$ 는 관측자료,  $P$ 는 모의자료를 의미한다. 또한,  $\bar{O}$ 와  $\bar{P}$ 는 각 자료의 산술평균을 의미한다. 모형의 검증 결과, 고령교 수위관측소의 관측 수위와 모의된 수위는 Fig. 4와 같다. 또한,  $R^2$ 는 0.972,  $RMSE$ 는 0.085m,  $NSE$ 는 0.972로 산정되어, 모형의 적용성에 문제가 없을 것으로 판단하였다.

이동상 모형에 대한 검토정은 관측 유사량 및 하상형상에 대한 시계열 자료가 존재하여 모의된 유사량 및 하상형상과

관측 유수량 및 하상형상을 비교하는 것이 가장 타당하지만, 국내의 유수량 관측은 간헐적으로 이루어지고 있어 직접적으로 이동상 모형에 대한 검증을 수행하는데 무리가 있다. 이러한 경우에는 모형에서 제공하는 유사이송공식을 직접 계산한 결과와 간헐적으로 측정된 유수량의 실측치를 비교하여 가장 유사한 결과를 도출한 유사이송공식을 적용하는 것이 일반적이다(Ji and Jang, 2016). Nays2DH는 유사이송공식으로 Meyer-Peter and Muller (1948) 공식과 Ashida and Michiue (1972) 공식을 제공하고 있다. Meyer-Peter and Muller 공식을 실험수로에서 균일한 유사를 이용하여 유도된 공식으로 Wong and Parker (2005)는 해석상의 오류를 발견하여 수정된 공식을 제시한바 있다. 따라서, 본 연구에서는 해석상의 오류가 존재하는 Meyer-Peter and Muller 공식을 제외하고, Ashida and Michiue 공식을 적용하였다.

### 3.3 배사 시나리오 수립

보 관리규정에서는 상한수위를 가동보 수문 개방의 기준이 되는 수위로 정하고 있으며, 관리수위란 보의 효율적인 운영을 위하여 설정한 고정보 상단의 수위를 의미한다(K-water, 2012). 따라서, 달성보의 수위를 상한수위 이상으로 상승시키는 홍수량이 도래하는 경우에는 보 관리규정에 의해서 수문을 개방하는 것이 일반적이다. 이를 기반으로 본 연구에서는 홍수량이 관리수위 이상이면서 상한수위 이하로 도래하였을 경우에 보의 수위관리에 따른 배사효율을 분석하였다. 이를 위해서 본 연구에서는 2014년 8월에 도래한 홍수사상을 기준으로 분석을 수행하였다. Fig. 5는 2014년 8월의 홍수사상시 하원관측소의 유량과 달성보의 수위를 나타낸 것이다.

본 연구에서는 Fig. 5와 같은 홍수량이 도래하였을 경우에 달성보에서 관리수위, 상한수위, 그리고 관리수위보다 0.5 m 낮은 수위, 상한수위보다 0.5 m 높은 수위로 보를 운영할 경우의 배사 효율에 대해서 수치해석을 수행하였다. 또한, 그 결과를 기존의 수문운영을 반영한 하상변동 결과와 비교·분석하였다.

## 4. 시나리오별 모의결과 및 최적 배사 시나리오 도출

본 연구에서는 다기능보의 배사효율을 최대화하여 저수지 퇴사를 저감하는 방안을 도출하기 위해서, 홍수기의 다기능보 운영수위 변화에 따른 2차원 하상변동 모의를 Nays2DH를 이용하여 수행하였다. 관리수위 및 상한수위, 관리수위보다 0.5 m 낮은 수위와 상한수위보다 0.5 m 높은 수위로 다기능보의 수문운영을 수행하였을 경우의 배사효과에 대해서 분석하여, 배사효과가 최대가 되는 운영수위를 도출하였다. 또한, 실제 다기능보 수문운영에 따른 하상변동 결과와 비교·분석을 수행하여 최적 배사 시나리오를 도출하였다. 배사효과를 분석하기 위해 대상이 된 다기능보는 달성보이므로, 하상변동에 대한 결과분석은 달성보를 중심으로 수행하였다.

### 4.1 다기능보 운영수위에 따른 배사효과 모의결과

달성보의 운영수위를 관리수위인 EL. 14.0 m보다 0.5 m 낮은 EL. 13.5 m로 운영하였을 때에는 Fig. 6(a)와 같이 하상변화가 발생하는 것으로 나타났다. 우안에 위치한 수문부터 좌안에 위치한 수문까지 수문 A, B, C라고 한다면, 수문 A에서부터 수문 C까지 약 322.4 m, 338.3 m, 133.7 m의 배사수로

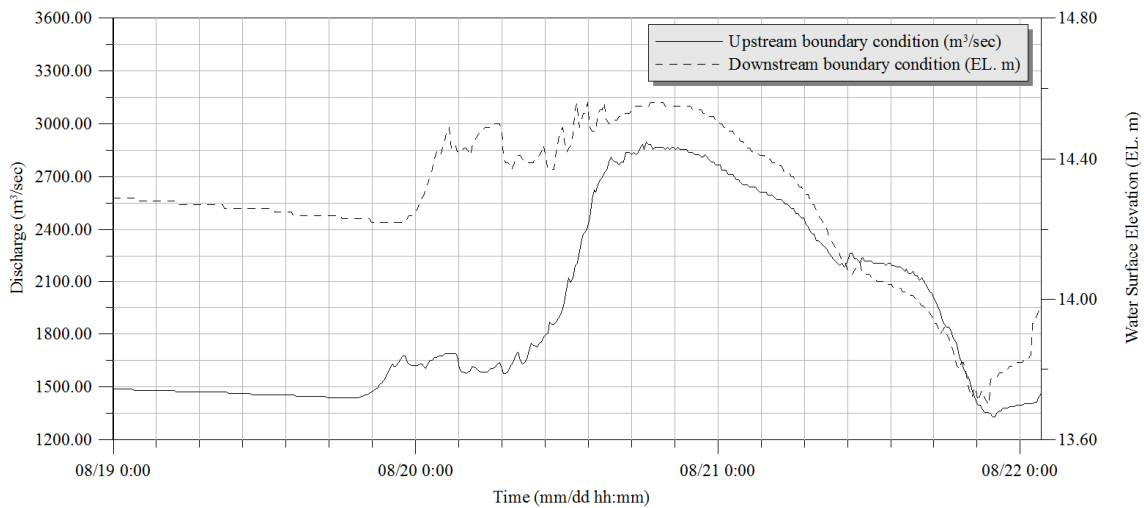


Fig. 5. Boundary conditions of flood event at Aug., 2014

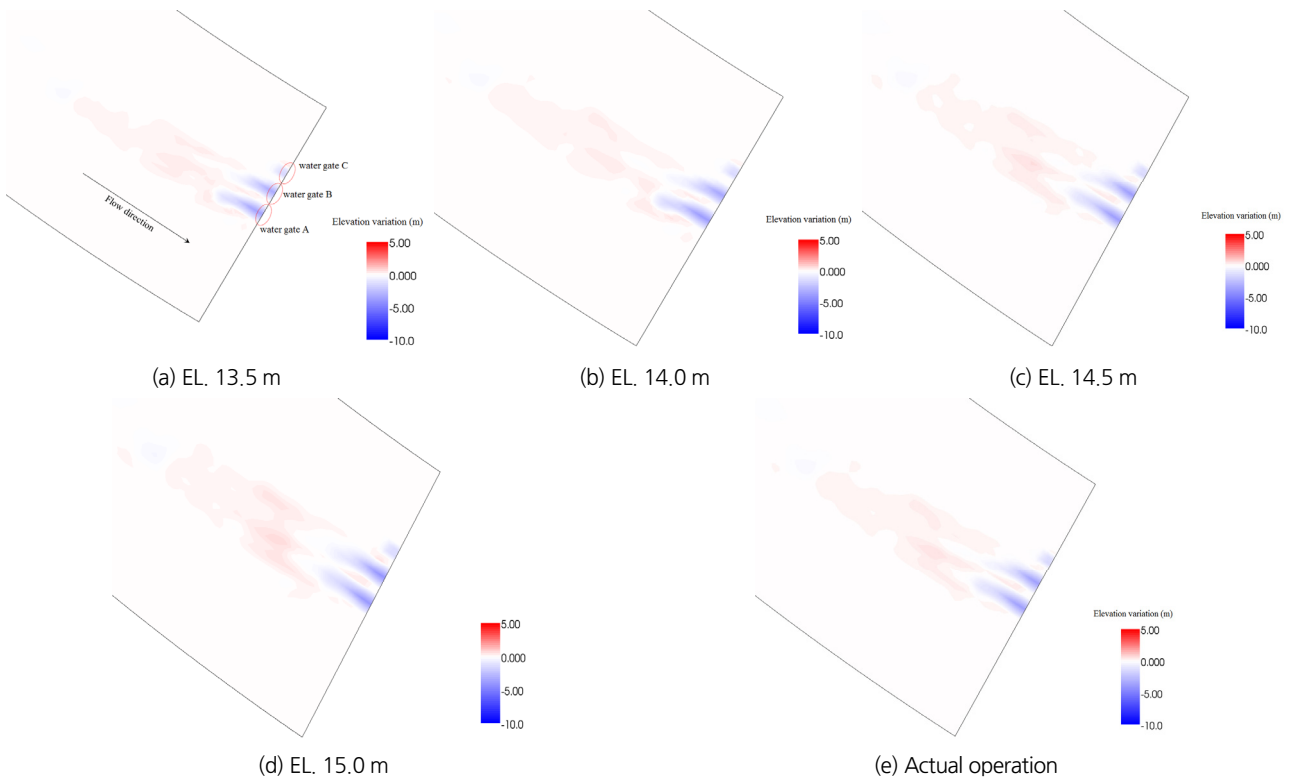


Fig. 6. Simulation results of sediment sluicing by variation of operation watersurface elevation

가 형성되며, 배사수로의 최대 폭은 수문 A부터 약 117.3 m, 117.6 m, 80.5 m로 모의되었다. 형성된 3개의 배사수로 중에서 수문 A를 통해 형성된 배사수로의 최대 세굴심은 6.9 m로 3개의 배사수로 중에서 가장 큰 세굴심을 보였으며, 수문 B와 수문 C를 통해 형성된 배사수로로는 각각 6.4 m와 3.0 m로 나타났다.

현재 달성보는 EL. 14.0 m를 기준으로 하는 관리수위를 수립하여 운영하고 있으며, 홍수기에도 관리수위를 유지하여 운영하는 경우에는 Fig. 6(b)와 같은 형태로 하상이 변화하였다. 수문 A부터 약 319.0 m, 340.7 m, 136.5 m의 배사수로가 형성되고, 116.3 m, 117.3 m, 81.3 m가 최대 배사수로 폭인 것으로 모의되었다. 최대 세굴심은 수문 A부터 7.4 m, 6.6 m, 2.9 m로 모의되었다.

달성보의 상한수위로 수립되어 있는 EL. 14.5 m를 유지하도록 수문운영을 모의할 경우에는 Fig. 6(c)와 같은 형태로 하상변화가 모의되었다. 배사수로는 수문 A부터 약 411.8 m, 368.6 m, 107.5 m의 길이로 형성되는 것으로 나타났으며, 최대 배사수로 폭은 수문 A부터 약 117.5 m, 119.3 m, 85.4 m로 형성되는 것으로 모의되었다. 수문 A부터 최대 세굴심은 각각 7.2 m, 7.4 m, 2.8 m로 나타났다.

Fig. 6(d)는 달성보의 상한수위인 EL. 14.5 m를 초과하는 EL. 15.0 m로 운영하였을 경우에 하상의 변화를 모의한 결과이다. 배사수로는 수문 A부터 339.0 m, 326.3 m, 81.7 m의 길이로, 각각 110.4 m, 109.5 m, 74.5 m의 폭을 가지는 것으로 나타났다. 또한, 각 배사수로의 최대 세굴심은 수문 A부터 7.94 m, 8.18 m, 2.7 m인 것으로 나타났다. 그러나, 본 연구의 대상인 달성보는 가동보의 첨단부 높이가 EL. 15.0 m이고, 현재 EL. 14.5 m를 상한수위로 계획하고 있기 때문에 상한수위를 초과하는 수위에 대해서는 배사 효과분석에서 제외하였다.

Fig. 6(e)는 실제 달성보의 수문운영에 따른 수위변화를 이용하여 하상변화를 모의한 것의 결과로, 수문 A에서는 약 369.3 m의 길이와 118.6 m의 폭을 가진 배사수로가 형성되었으며, 수문 B에서는 약 551.7 m와 117.0 m, 수문 C에서는 약 139.2 m와 84.3 m의 배사수로가 형성되는 것으로 모의되었다. 최대 세굴심은 수문 A부터 7.2 m, 7.4 m, 2.8 m로 나타났다.

모든 시나리오에서는 3개의 배사수로가 형성되었으며, 형성된 배사수로의 상류에서는 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 모의 시나리오별로 퇴적 양상은 차이가 있었으나, 모든 시나리오에서 달성보를 기점으로 약 1.3 km까지 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 다만, 운영수위를 높게 유지할수록 횡방

**Table 2.** Sediment sluicing channel and sedimentation distribution at each gate

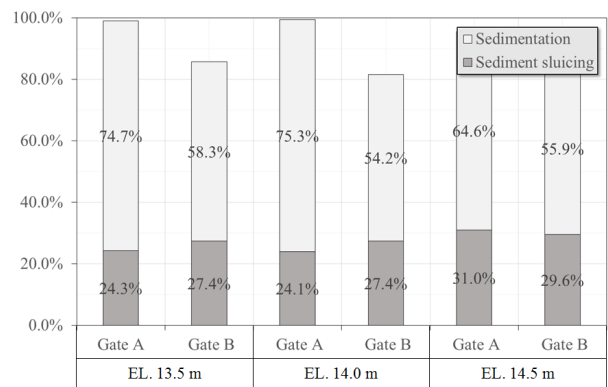
Gate operation watersurface elevation (EL. m)	Classification	Gate		
		Gate A	Gate B	Gate C
		Gate No. 2	Gate No. 1	Gate No. 3
13.5	Length of sluicing channel (m)	322.4	338.3	133.7
	Width of sluicing channel (m)	117.3	117.6	80.5
	Length of sedimentation area (m)	989.9	720.4	-
	Length of riverbed level variation area from Dalsung weir (m)	1,325.2	1,235.1	133.7
14.0	Length of sluicing channel (m)	319.0	340.7	136.5
	Width of sluicing channel (m)	116.3	117.3	81.3
	Length of sedimentation area (m)	997.9	672.8	-
	Length of riverbed level variation area from Dalsung weir (m)	1,325.1	1,241.4	136.5
14.5	Length of sluicing channel (m)	411.8	368.6	107.5
	Width of sluicing channel (m)	117.5	119.3	85.4
	Length of sedimentation area (m)	857.9	695.7	-
	Length of riverbed level variation area from Dalsung weir (m)	1,327.4	1,245.2	107.5

향으로 퇴적분포가 넓어지고, 퇴사량도 많아지는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 6).

**4.2 다기능보 운영수위에 따른 배사효과 분석**

다기능보의 가동보 수문운영은 계획된 문비번호의 순으로 운영된다. 현재 달성보의 문비번호와 각 수문에서의 배사수로 형성 및 퇴적분포는 Table 2와 같다. 수문운영을 수행할 경우, 최초로 고려되어 운영되는 문비번호 1에 해당하는 수문 B는 배사수로 및 퇴적분포에서 수문 A와 수문 C보다 배사수위가 크게 형성되며, 퇴사량의 분포도 작은 것으로 나타났다. 다만, 홍수기 다기능보 운영수위를 EL. 14.5 m로 운영하였을 경우에는 수문 A보다 배사수위의 폭은 크게 형성되지만, 배사수로의 길이는 작게 형성되는 것으로 나타났다. 또한, 수문 C 상류단에서는 퇴사가 발생하지 않고, 상대적으로 소규모의 배사수위가 형성되는 것으로 나타났다. 다른 수문의 배사수로보다 수문 C에서 배사수위가 상대적으로 작게 형성되는 현상으로 인해서, 수문 C에서의 배사효과가 전체 배사효과에 크게 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다.

각 수문의 상류단에 하상변동이 발생한 거리에 대해서 퇴사와 세굴이 차지하는 비율을 나타내었을 경우, 수문 A 상류단에서는 연장 1.3 km 내외의 길이에서 하상변동이 발생하며, 그 중에서 배사는 약 24.1~31.0%, 퇴사는 64.6~75.3%를 차지한다. 수문 B는 약 1.2 km 내외의 길이에서 하상변동이 발생하며, 배사가 차지하는 비율은 27.4~29.6%, 퇴사는 54.2~58.3%인 것으로 나타났다(Fig. 7). 따라서, 홍수기에 배사효율이 최대가 되는 운영수위는 EL. 14.5 m인 것으로 모의되었다. 홍수



**Fig. 7.** Efficiency of sediment sluicing

기에 다기능보 운영수위를 증가함에 따라서 배사수위는 증가하고, 퇴사 거리는 감소하는 것으로 나타났다. 배사의 효율을 높이기 위해서 저수지에서 수위는 낮아야 하는 것이 일반적인 규칙으로 알려져 있다(Jang et al., 2011). 그러나 이러한 규칙은 flushing 분야를 중심으로 연구되어온 결과이며, sluicing과는 차이가 있는 것으로 나타났다.

배사효율에 대해 분석한 결과, 운영수위가 증가함에 따라서 배사효율이 증가하고 퇴사분포가 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, 홍수기시 다기능보의 운영수위를 상향조정하였을 경우에는 증가하는 상류부의 홍수위험도를 고려해야 하며, 반대의 경우에는 하류부의 홍수위험도를 고려해야 한다. 본 연구에서 대상이 된 달성보의 경우에는 EL. 14.5 m를 상한 수위로 지정하여 운영하고 있으므로, 운영수위를 EL. 14.5 m까지 고려하였다.



## 5. 결론

본 연구에서는 홍수기 수문운영에 따른 배사효율을 분석하여, 배사효율을 최대화할 수 있는 홍수기 운영수위를 도출하기 위한 연구를 수행하였다. 본 연구에서 사용하고 있는 배사라는 용어는 수리학적 준설의 배사영역이 아니며, 유사우회 영역의 sluicing을 의미하고 있다. 국내외의 연구 및 실무에서는 배사라는 용어를 다양한 의미로 혼용하여 사용하고 있으므로, 이에 따른 혼란을 미연에 방지하고자 본 연구에서는 배사의 정의를 명확히 하였다. 배사효율을 분석하기 위해서 2차원 하상변동 모형인 Nays2DH를 사용하였으며, 관리수위, 상한수위 및 관리수위보다 0.5m 낮은 수위로 운영되었을 경우의 배사효과를 분석하였다.

분석결과, 홍수기에 운영수위를 EL. 14.5 m로 운영한 것이 EL. 13.5 m와 EL. 14.0 m에 비해서 배사가 더욱 효과적인 것으로 나타났다. EL. 14.5 m로 수문운영을 수행한 경우, 달성보 직상류의 하상변동 범위에서 배사가 29.6~31.0%, 퇴사가 55.9~64.6% 발생하는 것으로 나타났다. EL. 13.5 m와 EL. 14.0 m로 운영한 경우와 비교해서 배사수로의 규모는 약 1.23배, 퇴사범위는 0.94배 감소하는 것으로 나타났다. 따라서, 홍수기의 수문운영은 EL. 14.5 m 내외의 운영수위를 기준으로 운영하는 것이 저수지 퇴사 저감 및 배사를 위해 효율적일 것으로 판단된다. 그러나, 홍수기시 다기능보의 운영수위를 상향조정하였을 경우에는 증가하는 상류부의 홍수위험도를 고려해야 하며, 반대의 경우에는 하류부의 홍수위험도를 고려해야 한다. 홍수기시의 수문운영은 배사효율 뿐만 아니라 보 상하류의 홍수위험도를 반드시 고려해야 하며, 본 연구에서는 홍수위험도는 제외하고 분석을 수행하였다. 또한, 일반적으로 배사효율을 향상시키기 위해 저수지 수위를 낮게 유지하는 규칙과 상반되는 결과를 보였다. 이러한 규칙은 flushing 분야를 중심으로 연구된 결과이며, sluicing과는 차이가 있는 것으로 나타났다. 따라서, 배사 계획을 수립하는데 있어서 flushing과 sluicing의 구분을 명확하게 하여 수립할 필요가 있다.

본 연구에서 사용한 Nays2DH는 유사이송능력을 계산하기 위해 Meyer-Peter and Muller 공식과 Ashida and Michiue 공식을 제공하고 있다. 배사효율을 모의하기 위해서 해석상의 오류가 존재하는 것으로 알려진 Meyer-Peter and Muller 공식을 제외하고 Ashida and Michiue 공식을 선정하여 모의를 수행하였다. 그러나, 유사이송능력 공식 선정의 차이에 따라서 모의결과에 차이가 있을 수 있기 때문에, 실무에 적용하기 위해서는 다양한 유사이송공식에 대한 검토가 반드시 이루어

어져야 한다.

국내의 다기능보의 유지·관리를 위해서는 지속적인 유사관리가 수행되어야 한다. 지속적인 유사관리를 위한 다양한 방법이 존재하며, 준설과 배사는 대표적인 유사관리의 방법이라고 할 수 있다. 준설은 사회·환경적으로 부정적인 영향이 크며, 대규모의 예산을 필요로 하는 건설공사이다. 따라서, 수문운영을 통해서 배사의 효율을 증가시켜 저수지 퇴사를 저감하고, 이를 통해서 준설의 주기를 장기화하는 것이 효과적인 유사관리 방안이라고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서 분석한 운영수위 변화에 따른 배사효과의 변화는 중소규모의 홍수량이 도래하였을 경우에 저수지 퇴사 저감 및 준설주기의 장기화를 가능하게 하며, 결과적으로 장기적인 저수지 유사관리에 도움이 될 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2016년도 충남대학교 자체연구과제의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ahn, J., Yang, C. T., Boyd, P. M., Pridal, D. B., and Remus, J. I. (2013). "Numerical modeling of sediment flushing from Lewis and Clark lake." *International Journal of Sediment Research*, Elsevier, Vol. 28, pp. 182-193.
- Ashida, K. and Michiue, M. (1972). "Study on hydraulic resistance and bed-load transport rate in alluvial streams." *Transactions, Japan Society of Civil Engineering*, No. 206, pp. 59-64.
- Choi, S.-U. and Choi, S. (2012). "A quasi-steady model for sedimentation and flushing of reservoirs." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 45, No. 2, pp. 217-227.
- Cui, Y., Parker, G., Lisle, T. E., Gott, J., Hansler-Ball, M. E., Pizzuto, J. E., Allmendinger, N. E., and Reed, J. M. (2003). "Sediment pulses in mountain rivers: 1. Experiments." *Water Resources Research*, AGU, Vol. 39, No. 9, p. 1239.
- Hajiabadi, R. and Zarghami, M. (2014). "Multi-objective reservoir operation with sediment flushing: case study of Sefidrud reservoir." *Water Resour Manage*, Springer, Vol. 28, pp. 5357-5376.
- Jang, C.-L., Lim, K.-S., and Hwang, M. H. (2011). "Flushing sediment technique for mitigation of sedimentation in reservoir." *Water for Future*, KWRA, Vol. 44, No. 11, pp. 45-49.
- Jeong, A. and Jung, K. (2015). "Analysis of long-term riverbed-level and flood stage variation due to water gate operation of multi-functional weirs at Geum river." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 48, No. 5, pp. 379-391.

- Jeong, A., Kim, S., Kim, M., and Jung, K. (2015). "Environmental windows setting method for environmental-friendly river dredging in Nakdong river basin." *Journal of environmental policy*, Vol. 14, No. 4, pp. 45-61.
- Ji, U. and Jang, E. K. (2016). "Numerical analysis of lateral geomorphology changes by channel bed deposition and bank erosion at the river confluence section." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 49, No. 5, pp. 391-398.
- Ji, U., Julien, P. Y., and Park, S. K. (2011). "Sediment flushing at the Nakdong river estuary barrage." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 11, pp. 1522-1535.
- Kang, K.-H., Jang, C.-L., Lee, G. H., and Jung, K. (2016). "Numerical analysis of the morphological changes by sediment supply at the downstream channel of Youngju dam." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 49, No. 8, pp. 693-705.
- Kondolf, G. M., Gao, Y., Annandale, G. W., Morris, G. L., Jiang, E., Zhang, J., Cao, Y., Carling, P., Fu, K., Guo, Q., Hotchkiss, R., Peteuil, C., Sumi, T., Wang, H.-W., Wang, Z., Wei, Z., Wu, B., Wu, C., and Yang, C. T. (2014). "Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents." *Earth's Future*, Vol. 2, No. 5, pp. 256-280.
- Krause, P., Boyle, D. P., and Base, F. (2005). "Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment." *Advances in Geosciences*, European Geosciences Union, Vol. 5, pp. 89-97.
- Ku, Y. H., Song, C. G., Park, Y.-S., and Kim, Y. D. (2015). "A study on the field application of Nays2D model for evaluation of riverfront facility flood risk." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 35, No. 3, pp. 579-588.
- K-water (2012). *Dam operational practices handbook*.
- Meyer-Peter, E. and Mueller, R. (1948). "Formulas for bed-load transport." *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> Meeting of the International Association for Hydraulic*, International Association of Hydraulic Research, Delft, Sweden, pp. 39-64.
- Nelson, J. M., Shimizu, Y., Abe, T., Asahi, K., Gamou, M., Inoue, T., Iwasaki, T., Kakinuma, T., Kawamura, S., Kimura, I., Kyuka, T., McDonald, R. R., Nabi, M., Nakatsugawa, M., Simoes, F. R., Takebayashi, H., and Watanabe, Y. (2016). "The international river interface cooperative: Public domain flow and morphodynamics software for education and applications." *Advances in Water Resources*, Vol. 93, pp. 62-74.
- Noh, J., Lee, K., Hur, Y., and Kim, Y. (2014). "Simulation of long-term reservoir sedimentation and flushing." *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, KOSHAM, Vol. 14, No. 4, pp. 333-341.
- Shen, H. W. (1999). "Flushing sediment through reservoir." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 743-757.
- Shimizu, Y., Takebayashi, H., Inoue, T., Hamake, M., Iwasaki, T., and Nabi, M. (2014). *iRIC Software: Nays2DH Solver Manual*.
- Wong, M. and Parker, G. (2005). "Reanalysis and correction of bed-load relation of Meyer-Peter and Muller using their own database." *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 132, No. 11, pp. 1159-1168.
- Yu, M., Lee, Y., and Yi, J. (2016). "Flood inflow forecasting on Hantan river reservoir by using forecasted rainfall." *J. Korea Water Resour. Assoc.*, KWRA, Vol. 49, No. 4, pp. 327-333.