

# 다기능보의 수문운영에 따른 금강의 장기하상변동 및 홍수위변화 분석

## Analysis of Long-Term Riverbed-Level and Flood Stage Variation due to Water Gate Operation of Multi-functional Weirs at Geum River

정 안 철\* / 정 관 수\*\*

Jeong, Anchul / Jung, Kwansue

### Abstract

Multi-functional weirs has been installed in four rivers are hydraulic structures across the river. The structures were divided into movable and fixed weirs. Hence, riverbed-level variation and sediment transport can be varied due to water gate operation. In this study, the long-term riverbed-level variation of Geum river basin due to water gate operation of multi-functional weirs was studied. Result of this study shows that the variation of thalweg elevation was greater than the variation of annual average riverbed elevation due to multi-functional weirs construction and water gate operation. Maximum riverbed degradation of thalweg elevation that occurred was 2.79 m and riverbed aggradation was 1.90 m. Maximum riverbed degradation of the annual average riverbed elevation that occurred was 2.16 m and riverbed aggradation was 1.24 m. Analysis result of flood stage by the variation of riverbed-level shows that flood stages were increased in majorities area. The maximum increase in the value of flood stage was 2.23 m. For this reason, flood stages can be greater than the freeboard of the levees. Therefore, we should consider the water gate operation of multi-functional weirs when planning and managing sediment in the river. We are expecting to use the result of this study in river planning for river management and selecting the river regime.

**Keywords** : Multi-functional weir, Water gate operation, Riverbed-level variation

### 요 지

국내 4대강에 설치된 다기능보는 하천을 횡단하는 수공구조물로써 고정보와 가동보로 구분되어 설치되었으며, 각 다기능보의 수문운영 방식에 따라 유량이 변화하여 하상변동 및 유사이동 형태의 변화 가능성이 있다. 본 연구에서는 다기능보의 수문운영에 따른 장기 하상변동을 금강유역을 중심으로 연구하였다. 연구결과, 금강에서는 다기능보의 설치 및 수문운영 시나리오에 따라서 최심하상고의 변화가 연평균하상고의 변화에 비해서 상대적으로 큰 것으로 나타났다. 최심하상고의 하상저하는 최대 2.79 m, 하상상승은 최대 1.90 m까지 발생하는 것으로 나타났으며, 연평균하상고의 하상저하는 최대 2.16 m, 하상상승은 최대 1.24 m까지 발생하는 것으로 나타났다. 또한 하상변동에 따른 홍수위 분석 결과, 다기능보 설치 후에 홍수위가 대부분 상승하는 것으로 나타났으며, 최대 2.23 m까지 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 결과로 인해서 제방의 여유고를 상회하는 홍수위가 발생할 가능성이 있기 때문에, 하천의 유사관리 및 하천계획수립을 함에 있어서 다기능보의 수문운영을 고려해야 한다고 판단된다. 또한 본 연구결과는 향후 하천계획을 수립함에 있어서 종단적 하도관리 및 안정하상 채택 등을 위해서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 본다.

**핵심용어** : 다기능보, 수문운영, 하상변동

\* 충남대학교 공과대학 토목공학과 박사과정 (e-mail: anchuly@cnu.ac.kr)  
Ph.D Student, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

\*\* 교신저자, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수 (e-mail: ksjung@cnu.ac.kr)  
*Corresponding Author*, Professor, Dept. of Civil Engrg., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea

## 1. 서 론

보와 같이 하천을 횡단하는 수공구조물은 수위 및 유량 조절이 가능하다는 장점과 함께 흐름 및 유사의 연속성을 차단하여 지속적인 유사관리가 필요하다는 단점이 있다. 저수구역을 가지는 보와 댐 등의 수공구조물은 유속을 감소시키고, 구조물 상류구간에 유사퇴적을 유발함으로써 하상의 불안정화를 초래하게 된다. 유사퇴적은 홍수위 상승, 저수용량 감소, 구조물의 안정성 약화 등의 문제로 이어져 보의 기능적인 측면에 악영향을 미치게 된다. 최근 마무리된 4대강살리기 사업으로 인해서 4대강에 16개의 다기능보가 건설되었으며, 대부분의 다기능보에서 이와 유사한 문제가 발생할 가능성이 있다고 판단된다. 또한 국내에서 하천의 하상변동 연구는 대부분 보의 유무에 국한하여 연구가 진행되어 왔으며, 실무에서 역시 안정하상을 선정하는 과정에서 보의 수문운영에 대한 고려가 미비한 편이다.

하상변동에 대한 연구는 1970년대부터 연구가 활발히 전개되어 왔으나, 수공구조물의 영향 및 유무에 따른 하상변동 연구는 많은 반면에, 보나 댐 등의 수문운영을 고려한 연구는 많이 이루어지지 않았다. Ziegler and Nisbet (1995)는 Watts Bar Reservoir의 유사거동을 모의하였다. 1961년부터 1991년까지 총 30년 동안의 유사거동을 모의하기 위해서 SDEZL 모델을 적용하였다. Wu et al. (2007)은 중국 Sanmenxia댐을 운영에 따라서 하류의 유사거동을 연구하였으며, 연구결과 현재의 유사거동은 현재의 댐 운영뿐만 아니라 3~4년 전의 댐 운영까지도 영향이 미칠 수 있다고 주장하였다. 해당연구의 대상구간이 113.5km 임을 감안한다면 국내의 4대강의 댐 및 보의 수문운영은 향후 하상변동 양상에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다. Wang et al. (2007)은 Sanmenxia댐의 수문운영에 따른 Yellow river와 Weihe river의 지형변화를 연구하였다. 연구결과, Weihe river의 경우 퇴적뿐만 아니라 하상저하 문제가 발생하고, 이러한 문제는 Yellow river로 Weihe river가 유입되면서 하상을 상승시킨다고 주장했다. 또한 중방향으로의 하상고 관리를 위해서 하류 유출량 조절의 필요성에 대해서 주장하였다. Wang et al. (2007)의 연구결과에 따르면 국내에서는 4대강 본류에 다기능보의 수문운영을 통하여 하류 유출량을 조절한다면 중방향 하상고 관리가 가능할 것으로 판단된다.

국외 연구동향과 마찬가지로 국내 연구도 수문운영을 고려한 하상변동 연구는 미비한 편이다. Choi et al. (2008)은 2차원 하상변동 모형 중 하나인 SMS (Surface-water

Modeling System) 모형을 이용하여 연구를 수행하였다. 1986년의 하상단면자료를 이용해 12년간 하상변동 모형을 수행하여 모형을 검증하고, 1998년 실측단면과 비교 및 검토를 수행하여 2차원 장기하상변동 모형의 적용성을 검토하였다. Yeon et al. (2009)은 행정중심복합도시 주변의 금강과 미호천 일부 구간을 대상으로 하상변동 실태분석과 수위유지시설 설치에 따른 장기하상변동 예측을 수행하였다. 여기서 수위유지시설의 위치는 현재 세종보의 위치와 동일하며, 수위유지시설의 높이가 0~7m로 변화에 따른 5개의 케이스를 구성하여 모의하였다. Ji et al. (2009)은 한탄강 홍수조절댐의 설치 전·후의 상류 퇴사현상을 연평균 유량조건과 연간 유량변동을 고려한 대표유량수문곡선을 적용하여 비교·분석하였다. 또한 추가로 댐 건설 후 배사관의 설치 유무에 따른 배사관 주변과 댐 상류 하상 변화를 예측하였다. Jang and Woo (2009)는 대청댐 하류 구간에서 증가방류에 의한 유사의 이송 및 하상토의 변화 특성을 분석하였다. 연구결과 증가방류에 의해 하상토의 평균입경은 증가하고, 표준편차는 작아지며, 입경분포는 균등하게 변한다고 주장하였다. 그리고 증가방류기간 동안 하상토의 변화뿐만 아니라, 소류사 및 부유사를 관측하여 유량 및 유사량의 변화에 의한 하도 변화 특성을 파악해야 함을 지적하였다. NIER (2010)에서는 4대강 살리기 이후의 하상변동 예측과 준설량 및 주기 산정을 위해서 금강유역을 대상으로 연구를 진행하였다. 장기하상변동 모의는 총 6가지 시나리오를 가지고 수행하였으며, 시나리오별 특징은 모의를 위한 유량자료의 작성을 위하여 SWAT모형의 결과 중에서 가용한 자료기간을 3~30년까지 다양하게 적용하였다. Ahn and Lyu (2013)은 2차 모형인 CCHE2D를 이용하여 창녕함안보에 의한 흐름 및 하상변동 연구를 수행하였다. 2003년 태풍 매미 사상을 적용하여 분석한 결과, 4대강 살리기 사업 전에는 하상변동이 0.1m 내외로 발생하는 것으로 나타났으며, 준설과 다기능보가 설치된 이후에는 가동보의 직상·하류에서 세굴현상이 나타나고, 고정보가 위치해 있는 보 상·하류의 좌·우안은 퇴적이 발생함을 보였다.

국내외연구동향을 통해서 하천에서 수공구조물 및 해당 구조물의 운영에 따라서 하상변동의 양상이 변화될 수 있으며, 그 영향 또한 크다는 것을 알 수 있었다. 국내의 4대강은 상류의 다목적댐 외에도 본류의 중·하류에 다기능보가 설치되어 운영 중에 있다. 현재 운영중인 다기능보에 의해서 국내 4대강은 많은 하천환경의 변화를 겪고 있으며, 이는 하천관리기법에도 많은 영향을 주고 있다. 특히 다기능보는 흐름 및 유사의 연속성을 차단하기 때문

에 지속적인 유사관리가 요구되고 있는 상황이다. 국내에 건설된 16개의 다기능보는 고정보와 가동보로 구분되어 있으며, 가동보의 운영은 하상변동에 많은 영향을 줄 것으로 판단된다. 그러나 국내에서는 아직까지 수문운영에 따른 하상변동 양상의 변화에 대한 연구는 미비한 편이다. 따라서 본 연구에서는 4대강 살리기 사업으로 인해서 3개의 다기능보가 건설된 금강을 대상으로 다기능보 설치에 따른 수위·유량의 변화 및 하상변동 양상변화, 수문운영 시나리오에 따른 장기하상변동을 HEC-RAS를 이용하여 10년 동안의 하상변동을 모의하고, 분석하였다. 또한 하상변동 후의 단면자료를 이용하여 홍수위 분석을 수행하였다.

## 2. 연구대상구간 및 모형구축

### 2.1 연구대상구간

금강유역은 한반도 중서부에 위치하며, 충청도, 전라북도, 경상도, 경기도 일부를 포함하고 있다. 유역면적은 약 9,912.15 km<sup>2</sup>이고, 유로연장은 397.79 km이다(MLTMA, 2009). 본 연구에서는 매포 수위관측소부터 규암 수위관측소까지 약 69.1 km를 대상으로 하였다. 연구대상구간은 유입되는 지류 중 국가하천인 미호천이 존재하며, 4대강 살리기 사업으로 건설된 세종보, 공주보, 백제보가 운영되고 있다(Fig. 1).

세종보는 세종특별자치시 연기면 세종리에 위치하고 있으며, 11.8m(El. m)를 관리수위로 지정하여 운영되고 있다. 보의 연장은 총 348m로 가동보 223m, 고정보 125m로 설치되었다. 충남 공주시 우성면에 위치한 공주보는 총 연장이 280m로 가동보 220m, 고정보 32m로 설치되어 8.75m(El. m)를 관리수위로 지정하여 운영되고 있다. 백제보는 충남 부여군 부여읍에 위치하고 있으며, 가동보 120m, 고정보 191m로서 총 연장은 311m이다. 현재 관리수위를 4.2m(El. m)로 지정하여 운영되고 있다(Kwater, 2012). 향후 3개 다기능보의 수문운영에 따라서 금강의 수위·유량 및 하상변동 양상이 변화될 것으로 판단된다.

### 2.2 하상변동 모형의 비교·분석

하상의 상승과 저하에 따른 하상변동에 대한 해석적인 연구방법이란 하천흐름 및 유사이송을 지배하는 연속방정식, 운동방정식, 흐름저항방정식, 유사연속방정식, 유사량예측 방정식을 이용하여 수학적 방법에 의해 해법을 구하는 것이며 주로 컴퓨터 발전에 힘입어 이러한 지배방정식과 수치해석기법을 이용한 수학적 모형들이 많이 이용되고 있다. 이러한 수치모형들의 기본적인 원리는 하천흐름 및 유사이송을 지배하는 방정식을 유한차분법, 유한요소법 등의 수치기법을 이용하여 해를 구하는 것이다(Son et al., 2013).

일반적으로 하상변동 모의를 위해서 주로 이용하는 모

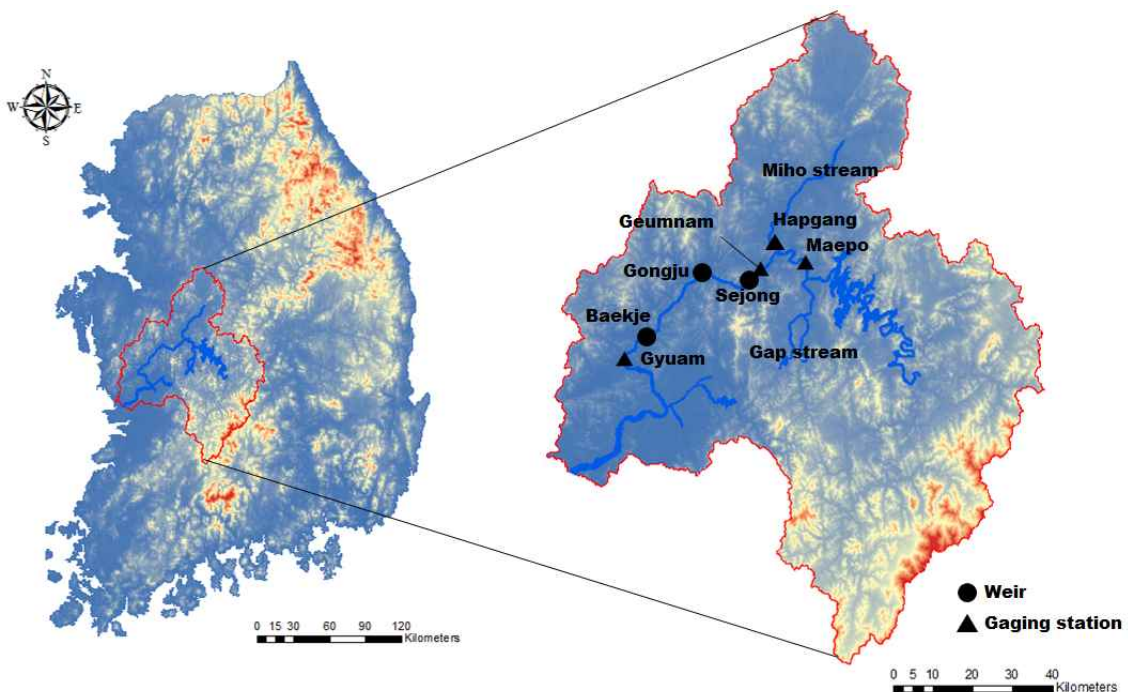


Fig. 1. Study Area, Geum River Basin

형에는 1차원모형인 HEC-RAS와 GSTARS, 2차원 모형인 SED2D와 CCHE2D, 3차원 모형인 EFDC가 있다. 2·3차원 모형은 횡방향 하상변동을 모의할 수 있다는 장점이 있지만, 현재까지는 장기 하상변동 모의를 수행하기에는 무리가 있다. 특히 SED2D와 CCHE2D의 경우에는 보와 같은 수공구조물의 수문운동을 고려할 수 없다는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 장기하상변동을 모의하기에 적합한 1차원 모형 중에서 보의 수문운동을 고려할 수 있는 HEC-RAS 모형을 이용하였다.

### 2.3 입력자료 및 모의조건

HEC-RAS를 이용하여 하상변동을 모의하기 위해 필요한 입력자료는 수리량 자료와 유사량 자료로 이루어지며, 수리량 자료는 하천지형자료, 조도계수, 유량 및 수위 자료로 이루어진다. 유사량 자료는 동점성계수 산정을 위한 수온자료와 상류경계에서 유입되는 유사량 및 하상도의 입도분포자료가 필요하다.

수리량 자료 중 하천지형자료는 4대강 살리기 사업의 계획단면을 이용하였다. 장기하상변동은 지속시간 및 유량을 어떻게 모의하는가에 따라 하상변동 및 유사이동의 형태가 달라지므로, 본 연구에서는 모의유량 조건으로 준시계열성을 가진 유량을 적용하였다. 준시계열성 유량이란, 연속적인 1년간의 유량변동을 특정시간동안 유량이 변하지 않는 불연속 유량으로 나열시켜 시계열성을 지닌 유량을 대신하는 것을 말한다(Chung et al., 2006; Yeon et al., 2009). 일반적으로 장기 유량자료는 극한 강우사상을 포함하고 있을 수 있기 때문에 극한 강우사상을 포함한 유량자료의 반복은 하상변동 양상을 과대 추정할 우려가 있다. 이에 비해서 준시계열성 유량자료는 장기 유량자료에 반영되는 극한 강우사상 등을 산술평균하여 배제함으로써, 해당 하천이 대표 유황성분을 도출하여 사용하기 때문에 장기하상변동모의에 주로 사용된다. 유량지속기간은 1년 단위로 홍수기로 분류되는 6월 21일부터 9월 20일까지는 일 평균 유량을, 1월 1일부터 6월 20일까지와 9월 21일부터 12월 31일까지는 각각 월 평균 유량을 적용하였다. 상류단 경계조건인 매포 수위관측소는 과거에 유량관측을 실시하지 않았으므로, 매포 수위관측소보다 하류부에 위치하는 금남 수위관측소의 유량자료와 유량-면적비법을 이용하여 매포 수위관측소의 준시계열성 유량을 작성하여 상류단 경계조건으로 사용하였다. 매포 수위관측소의 준시계열성 유량 작성을 위해서 사용된 유량자료는 4대강 살리기 사업 전인 2000년부터 2009년까지의 금남 수위관측소 유량자료를 이용하였다. 또한 유입지류

로 고려한 미호천 역시 2005년부터 2010년까지의 유량자료를 이용하여 같은 방법으로 준시계열성 유량을 작성하여 사용하였으며, 10년 동안 동일유량이 반복되는 경우로 모의하였다. HEC-RAS에서 하상변동을 모의할 경우, 하류단의 경계조건으로 등류수심, 시계열 수위자료, 수위-유량 관계곡선 중 하나를 선택하여 사용할 수 있다. 등류수심은 하류단 경계조건으로 사용하여 하상변동을 모의하는 것은 하류단 경계조건이 시간변화에 상관없이 하나의 값으로 모의하기 때문에 하상변동 모의에 적절치 않다(USACE, 2010). 또한 시계열 수위자료는 다기능보의 수문운영에 따라 변화하기 때문에 하류단 경계조건으로 사용하는 것은 부적절하다. 따라서 본 연구에서는 한국수문조사연보(MLTMA, 2010)에서 제시한 규암 수위관측소의 수위-유량 관계곡선을 하류단 경계조건으로 사용하였다. 그 외 조도계수 등의 자료는 금강수계 하천기본계획(MLTMA, 2009)에서 제시한 값을 이용하였다.

유사량자료 중에서 수온자료는 세종특별자치시 연기면에 위치하고 있는 연기 수질측정망의 2012년과 2013년의 평균값을 사용하였다. 연구대상 구간의 상류부터 하류까지의 수온은 각 지점별로 상이하겠지만 모든 지점의 수온을 고려하는 것은 어렵기 때문에 연구대상 구간의 중간정도 지점에 위치한 연기 수질측정망의 자료를 이용하였다. 유입유사량은 금강유역조사(MOCT, 2006)에서 측정된 매포 수위관측소의 유량과 유사량을 이용하여 유량-유사량 곡선을 개발하였으며(Eq. (1)), 미호천은 미호천 유량 및 유사량 조사 연구(KICT, 2007)에서 제시한 유량-유사량 관계곡선식을 사용하였다(Eq. (2)).

$$Q_s = 0.0037Q^{2.0122} \quad (1)$$

$$Q_s = 0.8827Q^{1.5744} \quad (2)$$

하상변동 및 유사이동의 형태는 유량 및 지속시간과 깊은 상관관계를 갖는다. 따라서 대상구간내에 수공구조물이 존재할 경우, 수공구조물의 영향을 고려해야만 이상적인 하상변동모의라고 할 수 있다. 본 연구의 대상구간 내에는 총 3개의 다기능보가 설치되어 있기 때문에 다기능보의 수문운영은 하상변동의 형태에 많은 영향을 줄 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 다기능보의 수문운영을 고려하기 위한 5가지 시나리오를 구성하여 모의하였다(Table 1). 시나리오 4와 시나리오 5에서 언급되는 홍수기는 다목적댐 관리규정(Kwater, 2012)에서 제시하고 있는 6월 21일부터 9월 20일까지를 의미한다. 또한 하상변동 모의를 위해서 금강수계 하천기본계획(MLTMA, 2009)에

**Table 1. Scenario of riverbed-level variation simulation**

Scenario	Water gate operation rule in each scenario
Scenario 1	Not construction of multi-functional weirs
Scenario 2	Not operating every water gate at all season
Scenario 3	Operating every water gate at all season
Scenario 4	Operating every water gate at flood season
Scenario 5	Operating only one water gate on each weirs at flood season

서 제시한 Yang공식을 사용하였다. 하상분급과 장갑화를 모의하기 위해서 3개의 혼합 하상층을 고려하는 Exner 5 방법을 이용하였으며, 유사의 침강속도 계산을 위해서 구체에 작용하는 항력을 구체 표면에서의 점성에 의한 마찰 저항과 구체 앞면의 압력 차이에 의한 형상 저항의 합으로 표현되는 Rubey 방법을 사용하였다.

### 3. 장기하상변동 모의결과 및 분석

본 연구에 대상구간인 금강분류 중 일부구간은 4대강 살리기 사업으로 3개의 다기능보가 연속적으로 위치하고 있으며, 보 상류의 수위를 관리수위로 유지하여 가용 수량 확보 및 수재해 방어를 목적으로 하고 있다. 본 연구에서는 다기능보 건설 및 다기능보에 설치된 가동보 및 고정보의 운영 방법에 따른 하상변동 양상 및 수위변화를 5개의 시나리오를 통하여 검토하였다. 또한 하상상승 및 저하가 활발한 우심지역을 대상으로 하상변동 양상을 분석하였다.

#### 3.1 최심하상고와 평균하상고의 비교·분석

최심하상고와 평균하상고는 일반적으로 하상변동 양상 분석을 위해 대표적으로 사용되는 하상고이다. 최심하상고는 하천단면의 하상고 중에서 가장 낮은 값을 지칭하며, 평균하상고는 계획 홍수위 또는 기준 수위 값에서 하도단면적/수면폭을 계산하여 절대 표고로 나타낸다(KWRA, 2009). 국부적인 하상저하나 세굴이 있는 경우 최심하상 변화는 전체적인 하천의 하상변동을 과도하게 보일 우려가 있기 때문에 최심하상고를 이용한 분석은 부적합하다고 판단되며, 계획홍수위를 사용하여 계산한 평균하상고는 주수로 뿐만 아니라 홍수터까지 포함하여 평균하상을 과대하게 산정하는 경향이 있다. 본 연구의 대상구간의 최심하상고와 평균하상고를 분석해본 결과, 최대 8m이상 차이를 보임에 따라 평균하상고가 각 다기능보의 마루보다 높은 것으로 나타났다(Fig. 2). 따라서 본 연구에서는

Yu (2011)에 의해 제안된 연평균하상고 개념을 추가로 분석에 이용하였다. 연평균하상고란, 연평균홍수량에 따른 연평균홍수위를 산정하여 기준수위로 사용하는 것을 말한다.

연구대상구간의 최심하상고와 평균하상고, 연평균하상고를 산정하여 다기능보의 직상류를 중심으로 비교·분석하였다. 다기능보의 직상류의 최심하상고는 다기능보 정상표고에 세종보는 약 5.24 m, 공주보는 8.05 m, 백제보는 5.31 m 아래에 존재하는 것으로 보인다. 반대로 평균하상고는 다기능보의 정상표고보다 높은 지점들이 있는 것으로 나타났다. 세종보와 백제보는 정상표고보다 약 0.37 m, 0.51 m 정도 높은 것으로 나타났으며, 공주보만 정상표고에 약 3.61 m 아래쪽에 위치하는 것으로 나타났다. 일부 다기능보의 직상류의 평균하상고가 다기능보의 평균하상고보다 높게 산정됨으로써 하상변동 양상분석을 위해서 평균하상고를 사용하는 것은 바람직하지 않은 것으로 판단된다. 연평균하상고를 산정한 결과, 세종보는 2.68 m, 공주보 7.25 m, 백제보 4.89 m 정도 보 마루보다 아래쪽에 위치하는 것으로 나타났다. 분석결과, 하상변동 양상분석을 위해서 연평균하상고를 사용하는 것이 가장 적절하다고 판단되었다. 그러나 연평균하상고의 산정방식이 가지는 특성상 하상변동이 실제 발생하는 데도 불구하고 하상변동이 발생하지 않는 것처럼 표현될 우려가 있다. 따라서 본 연구에서는 연평균하상고와 최심하상고를 사용하여 하상변동 양상을 분석하였다.

#### 3.2 시나리오별 하상변동 비교·분석

모의결과 분석을 위해서 최심하상고와 연평균하상고를 사용하였다. 다기능보가 없는 상황을 모의한 시나리오 1을 제외한 나머지 시나리오 모의결과에서 연평균하상고를 산정 조건의 일관성을 유지하기 위해서 다기능보의 모든 가동보가 개방된 상태로 가정하여 산정하였다.

시나리오 1은 3개의 다기능보가 건설되지 않았을 경우를 나타낸다. 시나리오 1에 따른 하상변동 모의결과, 연평

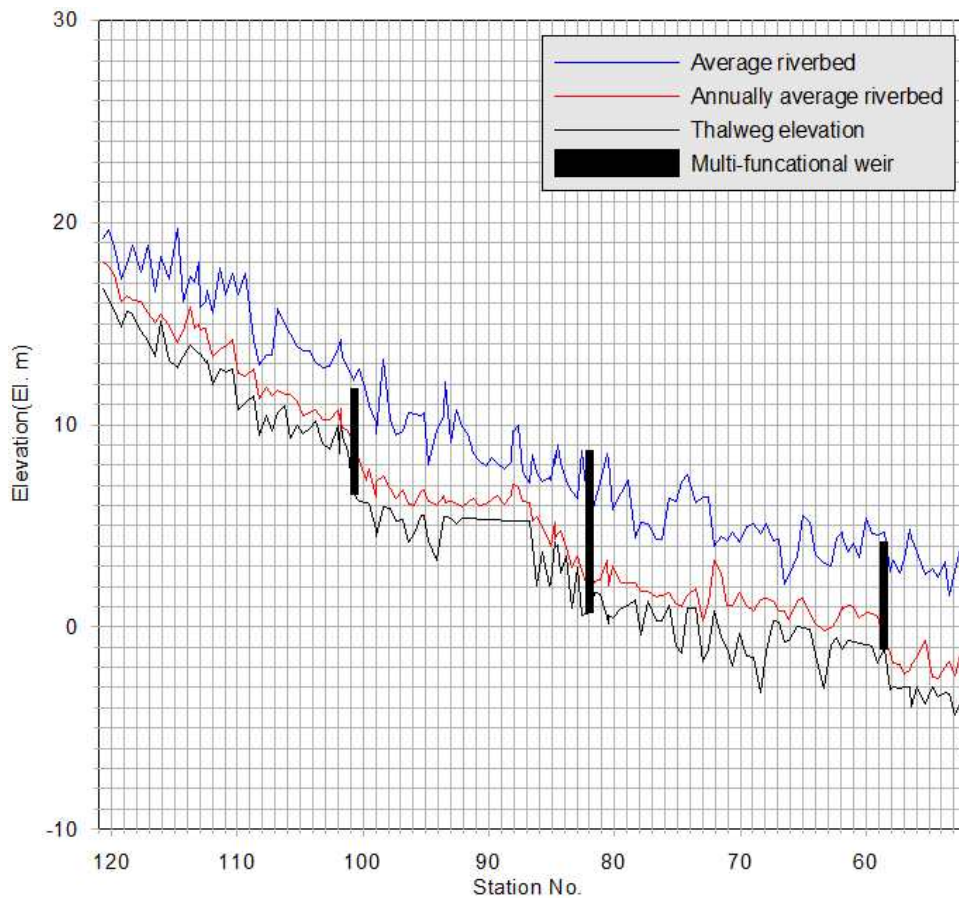


Fig. 2. Comparison of Riverbed Elevation

균하상고의 경우에는 연구대상 구간의 상류경계부터 현재 세종보가 건설된 지점까지 최대 1.18 m, 평균적으로 0.20 m 내외의 하상변동이 발생하는 것을 알 수 있었다(Fig. 3(a)). 하상저하가 활발한 세종보 건설지점 상류구간 중 Station No. 108+750에서 국부적인 하상상승이 발생하는 것으로 나타났는데, 해당지점은 미호천이 합류하는 지점으로 미호천에서 유입되는 유사량에 의한 것으로 판단된다. 그 외의 지역에서는 대부분 하상이 상승하는 것으로 나타났으나, 변동 폭이 평균적으로 0.03 m 내외로 비교적 안정하상인 것으로 나타났다. 반면에 최심하상고는 현재 공주보가 건설된 지점보다 상류에서 하상변동이 주로 발생하였으며, 하류로는 비교적 하상변동이 적은 것으로 나타났다(Fig. 3(b)). 대부분의 하상변동이 발생하는 구간 중에서 미호천 합류전 Station No. 111+400부터 세종보 건설지점 직상류까지와 공주보 상류 Station No. 93+060부터 공주보 건설지점까지 하상저하가 지배적인 것으로 나타났다. 미호천 합류전 Station No. 111+400부터 세종보 건설지점 사이에서 국부적으로 하상상승이 발생하며, 해당구간은 미호천이 합류하는 지점으로 미호천에서 유

입하는 유사량에 의한 것으로 판단되며 이러한 현상은 연평균하상고와 같은 양상을 보였다. 국부적으로 하상상승이 발생하는 구간을 제외하면 Station No. 111+400부터 세종보 건설지점은 최대 1.37 m, 평균적으로 0.71 m의 하상저하가 발생하는 것으로 나타났다. Station No. 93+060부터 공주보 건설지점의 하상저하는 최대 1.17 m, 평균적으로 0.50 m 발생하는 것으로 나타났다.

시나리오 2는 다기능보가 건설된 후 가동보는 개방하지 않고 고정보만 운영하였을 경우로 연평균하상고는 연구대상 전구간에서 평균 하상변동량이 0.01 m 이하로 하상변동이 거의 발생하지 않는 비교적 안정하상인 것으로 나타났다(Fig. 3(c)). 그러나 최심하상고는 세종보를 중심으로 상류부에서 하상변동이 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 3(d)). 미호천이 합류되는 구간에서 국부적인 하상상승이 발생하며, 그 외의 세종보 상류구간에서는 대부분 하상저하 현상이 발생하는 것으로 나타났다. 세종보를 중심으로 하류구간에서 하상변동이 발생하지 않은 주된 이유는 유사의 연속성이 세종보에 의해서 차단되었기 때문으로 판단된다. 시나리오 2의 경우에는 연평균하상고는

하상변동이 거의 발생하지 않았고, 최심하상고만 변화를 보임에 따라 다양한 하상고 개념을 이용하여 하상변동을 평가해야 하는 근거가 될 수 있다고 생각된다.

시나리오 3은 다기능보 건설 후에 가동보를 모든 기간에 개방하고 있는 시나리오로써 연구대상 전구간에서 연평균하상고가 변화되는 것을 알 수 있었다(Fig. 3(e)). 연평균하상고가 공주보를 중심으로 상류부에서는 평균 0.40 m의 하상변동이 발생하는 반면, 하류부는 0.09 m로 하상변동량에 따른 구간이 구분되었다. 주된 하상변동이 발생하는 공주보 상류부에서 공주보와 세종보의 직상류에서 하상저하가 지배적이었으며, 이런 상황은 다기능보의 가동보 개방으로 인해 고유량이 발생하는 홍수기에 가동보 지점으로 유수력이 집중되어 하상저하가 발생하는 것으로 생각된다. 이러한 과정은 저수지의 퇴적유사를 제거하는 기법 중 하나인 배사기법과 유사하다고 볼 수 있다. 배사에는 일반적으로 2가지 유형이 있는데, 첫 번째는 흐름을 이용하여 유사퇴적이 발생하는 것을 방지하는 것이고, 두 번째는 고유량 발생하는 기간에 흐름을 이용하여 유사를 하류로 흘려보내는 형태이다(Shen, 2010). 시나리오 3에서 발생하는 형태는 이 두 가지 유형이 조합된 배사라고 할 수 있다. 그러나 배사기법이 가지는 단점 중 하나로 하류의 재퇴적이 있는데, 이러한 이유로 세종보 및 공주보 하류에 하상상승을 초래하는 것으로 판단된다. 세종보와 공주보 사이 구간은 이러한 현상이 교차되면서 발생하며, 세종보에서 배사되는 유사의 재퇴적과 공주보 배사로 인한 하상저하는 세종보 하류 Station No. 93+499를 기준으로 서로 상반되는 하상변동 양상을 나타냈다. 최심하상고 역시 연평균하상고와 유사한 하상변동 양상을 보였으나 전체적인 하상변동량은 연평균하상고보다 평균적으로 0.04 m 정도 큰 것으로 나타났다(Fig. 3(f)). 하상저하가 발생하는 구간에서 연평균하상고와 최심하상고는 평균적으로 0.43 m, 0.59 m의 하상저하를 보임에 따라 최심하상고의 단점으로 지적된 국부적인 하상저하나 세굴을 과대평가하는 경향이 나타났다(Yu, 2011).

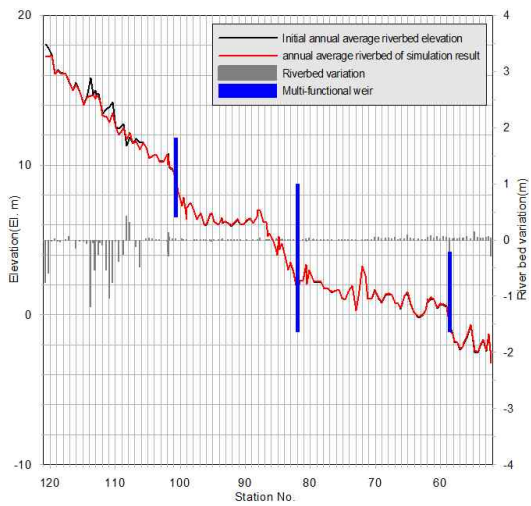
시나리오 4는 다기능보가 건설된 후에 가동보를 홍수기에만 개방하는 시나리오로써 연평균하상고는 공주보를 중심으로 하류에 비해서 상류에서 하상변동이 활발한 것으로 나타났다(Fig. 3(g)). 상류부와 하류부의 하상변동량의 평균을 비교해보면 상류부는 0.32 m, 하류부는 0.06 m로 약 0.26 m 차이를 나타냈다. 미호천 합류점부터 Station No. 101+882까지 하상상승 경향을 보였으며, 최대 0.93 m까지 상승하는 것으로 나타났다. 이러한 현상의 주된 이유는 세종보에 의해서 유사의 연속성이 차단된 결과로

판단되며, Station No. 101+882부터 세종보 사이 구간에서 발생하는 하상저하는 배사효과에 의한 것으로 판단된다. 최심하상고는 연평균하상고의 하상상승은 거의 반영을 못하고, 하상저하만 과대하게 반영하는 것으로 나타났다(Fig. 3(h)). 국부적인 하상저하나 세굴을 과대평가하는 것으로 알려진 최심하상고의 단점을 보여주는 결과로 세종보 상류에서 최대 2.65 m의 하상저하가 나타났으며, 동일 지점의 연평균하상고의 하상저하는 2.18 m로 약 0.47 m 과대평가하는 것으로 나타났다. 같은 이유로 인해서 각 다기능보에 의한 유사의 연속성 차단효과는 최심하상고에서 나타나지 않았다. 또한 연평균하상고에서 하상상승이 가장 두드러지게 나타난 Station No. 103+160의 하상상승량이 약 1.46 m인데 비해서 최심하상고는 0.01 m를 보임에 따라 하상상승은 과소평가 및 하상저하는 과대평가가 이루어진다는 것을 알 수 있었다. 따라서 하상변동을 분석함에 있어서 최심하상고 외에도 연평균하상고와 같은 다른 개념의 하상고에 대한 분석도 이루어져야 하는 근거가 될 수 있다고 판단된다.

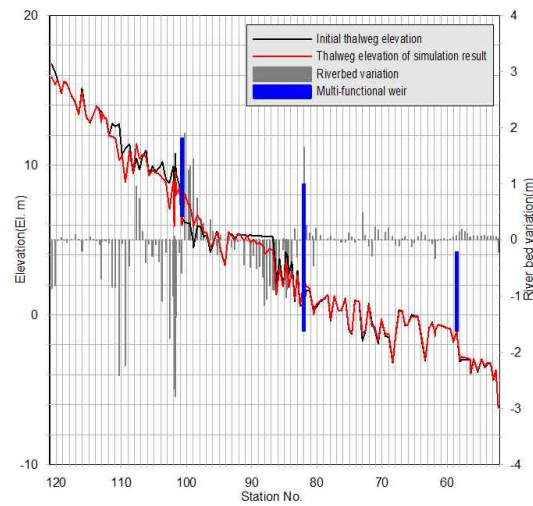
시나리오 5는 시나리오 4와 유사하지만 홍수기에 가동보를 개방함에 있어서 수문작동 문비순서에 따라 우선적으로 개방되는 문비만을 이용해서 방류하는 경우이다. 연평균하상고의 경우에는 하상변동이 대부분 세종보 상류에서 발생하는 것을 알 수 있었다(Fig. 3(i)). 각 다기능보의 가동보 수문을 하나씩만 개방함에 따라 유사의 연속성이 시나리오 3, 4에 비해서 차단되고, 시나리오 2에 비해서 보장되는 것으로 판단된다. 이러한 이유로 인해서 시나리오 5에 의한 하상변동 모의결과는 시나리오 3, 4의 결과보다 평균적으로 0.18 m, 0.13 m 정도 하상변동량이 작고, 시나리오 2의 결과보다 0.08 m 큰 것으로 나타났다. 최심하상고는 연평균하상고와 유사한 양상을 보였으며, 변동폭 역시 거의 차이를 보이지 않았다(Fig. 3(j)). 다만 최심하상고가 다른 시나리오에서 보였던 하상저하의 과대평가 및 하상상승의 과소평가가 시나리오 5에서도 나타났다. 미호천 합류점부터 세종보 사이의 구간에서 하상상승이 발생한 구간에서 미호천 합류점을 제외하고는 하상상승이 최대 0.78 m 정도 과소한 것으로 나타났다.

### 3.3 하상변동에 따른 수위변화 분석

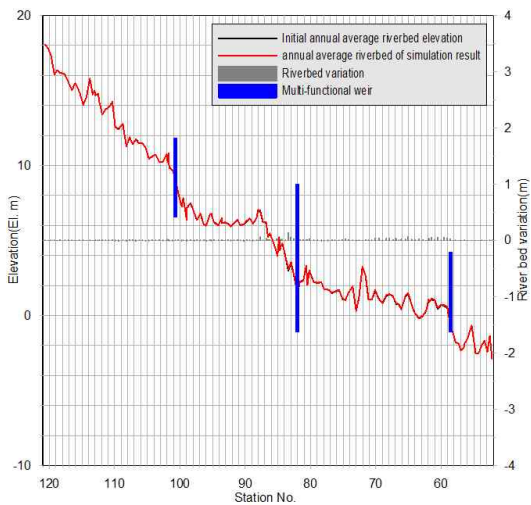
일반적으로 하천의 홍수소통능력과 하천구조물의 안전에 미치는 영향을 파악하고 적절한 조치를 취하기 위해서 하상변동 조사 및 예측을 수행한다(KWRA, 2009). 따라서 하상변동을 예측하였을 경우에는 하상변동양상에 따른 수위 및 유량 변화에 대한 분석이 이루어져야 한다. 본



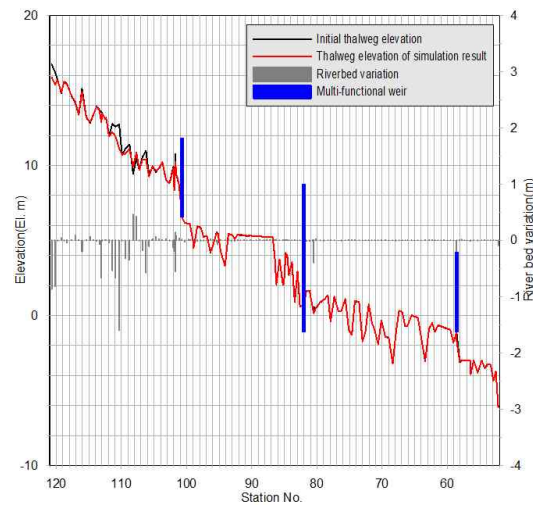
(a) Annual average riverbed elevation of scenario 1; not construction of multi-functional weirs



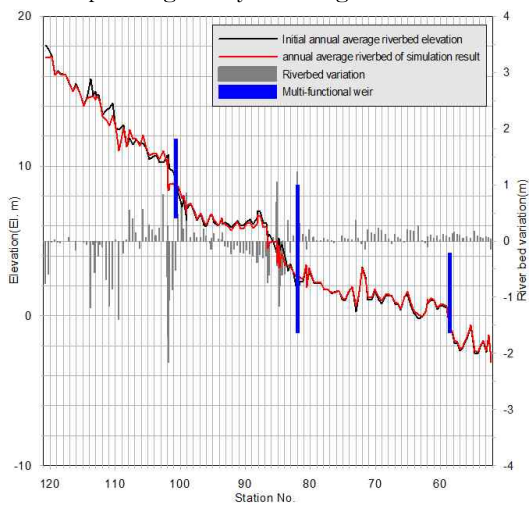
(b) Thalweg elevation of scenario 1; not construction of multi-functional weirs



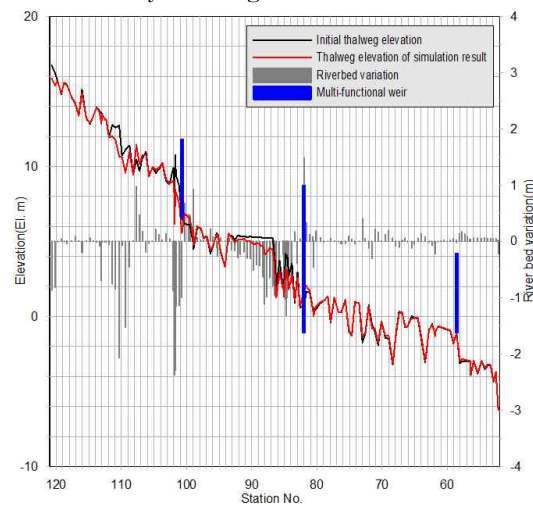
(c) Annual average riverbed elevation of scenario 2; not operating every water gate at all season



(d) Thalweg elevation of scenario 2; not operating every water gate at all season



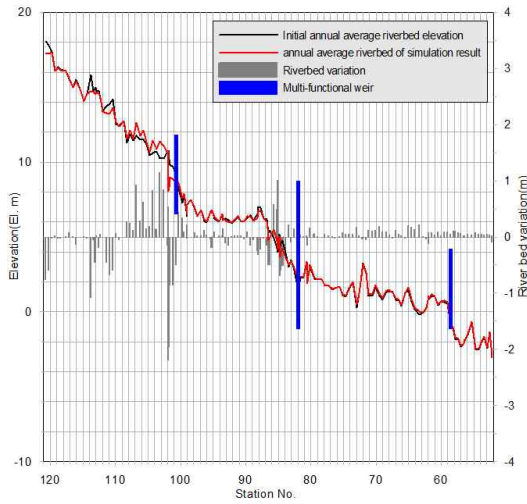
(e) Annual average riverbed elevation of scenario 3; operating every water gate at all season



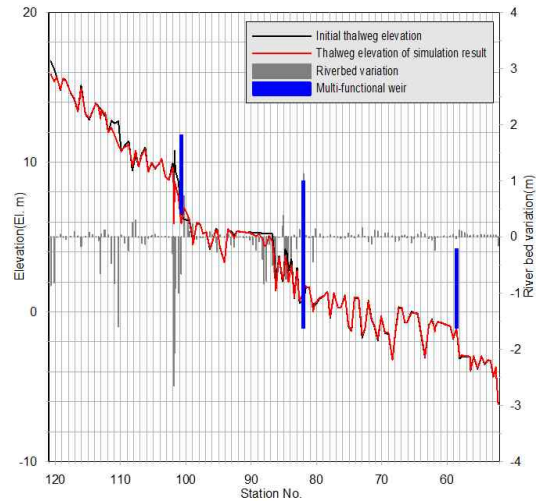
(f) Thalweg elevation of scenario 3; operating every water gate at all season

Fig. 3. Simulation Result of Riverbed Change after 10 Years

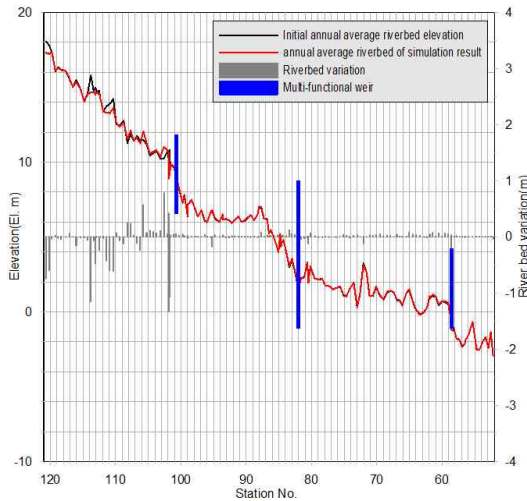




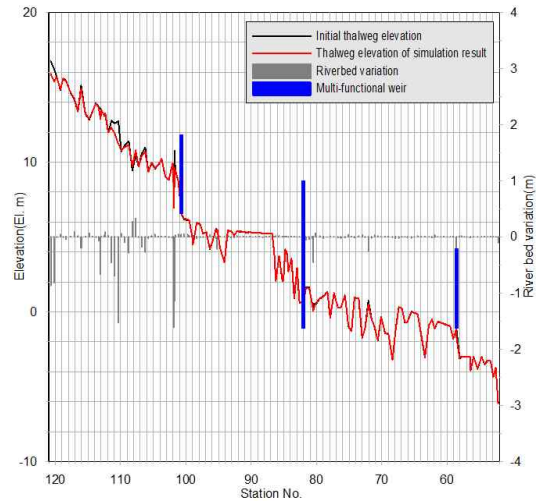
(g) Annual average riverbed elevation of scenario 4; operating every water gate at flood season



(h) Thalweg elevation of scenario 4; operating every water gate at flood season



(i) Annual average riverbed elevation of scenario 5; operating only one water gate on each weirs at flood season



(j) Thalweg elevation of scenario 5; operating only one water gate on each weirs at flood season

Fig. 3. Simulation Result of Riverbed Change after 10 Years (continued)

연구의 대상구간에서는 행복도시구간을 제외하고 모두 100년 빈도홍수량을 채택하고 있다. 따라서 본 연구에서는 하상변동 전과 10년 하상변동 이후에 100년 빈도홍수량에 따른 전체 대상구간의 홍수위변동을 분석하였다. 100년 빈도홍수량은 상류단 경계인 매포수위표에서  $7,175 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 홍수위 모의를 위해서 모든 다기능보의 가동보 수문은 개방된 상태로 모의하였다. 또한 흐름조건은 상류와 사류를 모두 모의할 수 있는 혼합류 상태로 모의하였다.

시나리오 1에 따른 하상변동 결과를 이용한 홍수위는 수위변화가 거의 발생하지 않지만, 하류로 갈수록 홍수위가 점차 높아지는 경향을 보였다(Fig. 4(a)). 상류부에서

수위가 약 20 cm 정도 하강하는 형태를 나타내는 구간은 하상변동이 진행되면서 하상저하가 발생하는 구간으로 하상저하가 홍수위 하강에 주요한 원인으로 판단된다. 하류로 갈수록 홍수위가 점차 높아져 최대 약 24cm까지 수위가 상승하는 것으로 나타났으며, 연평균하상고 및 최심하상고의 상승으로 인한 것으로 보인다.

시나리오 2에 따른 하상변동 결과를 이용한 홍수위는 연평균하상고의 변화가 거의 발생하지 않은 시나리오로 홍수위의 변화 역시 대부분의 구간에서 차이가 나지 않는 것을 알 수 있었다(Fig. 4(b)). 그러나 최심하상고의 하상저하가 크게 나타난 구간인 세종보 상류구간에서 홍수위가 약 15 cm 내외로 하강하는 현상을 나타내었다.

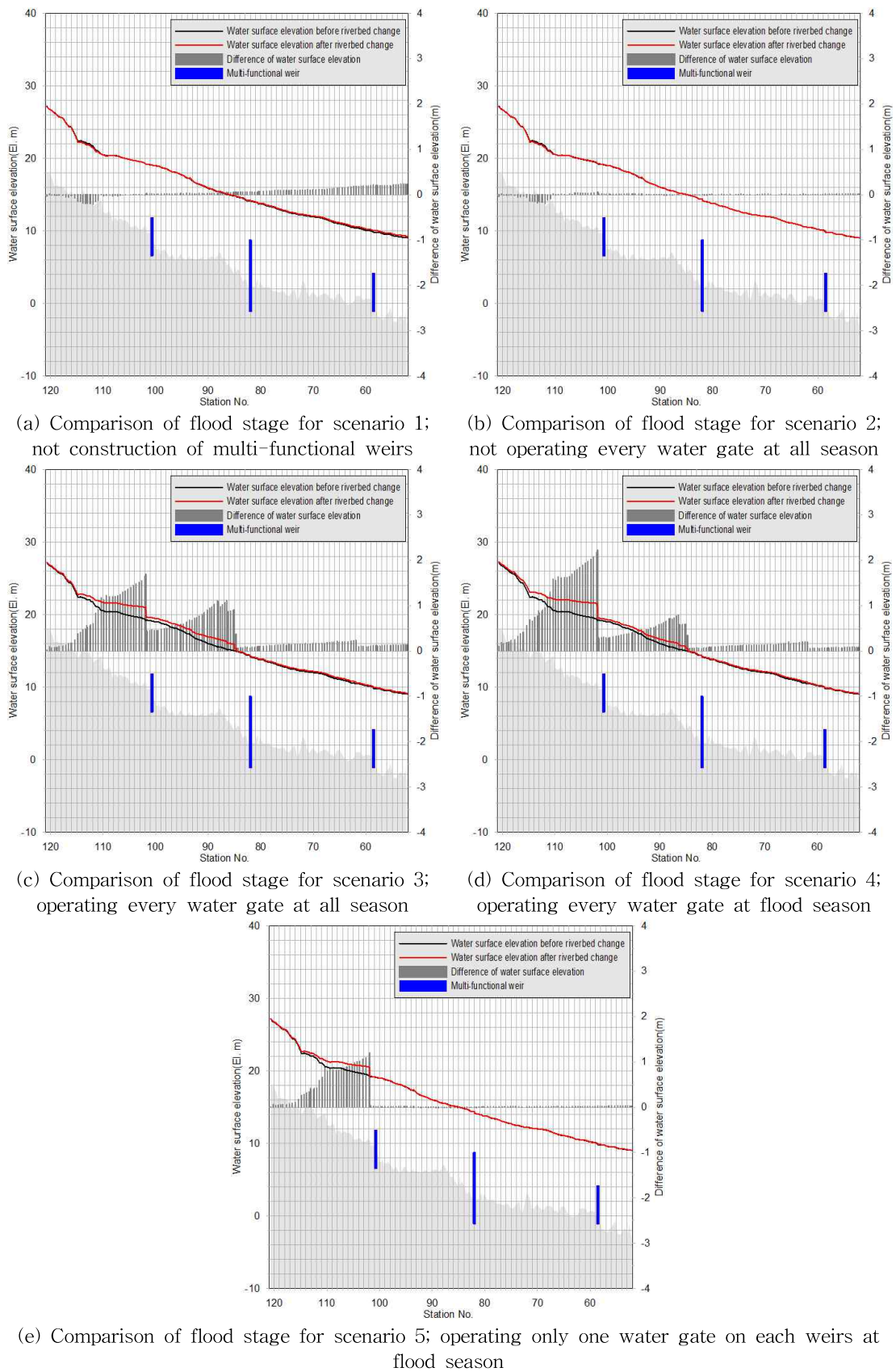


Fig. 4. Simulation Result of Flood Stage after 10 Years

시나리오 3에 따른 하상변동 결과를 이용한 홍수위는 다기능보가 위치한 지점에서 상류방향에 홍수위의 단차가 발생하며 홍수위가 높아지는 경향을 나타내었다(Fig. 4(c)). 세종보 상류에서 홍수위 상승이 최대 1.70m로 가장 크게 나타났으며, 그 이후로는 공주보 상류에서 1.11 m 상승하는 것으로 나타났다. 그 외의 구간에서도 홍수위 상승이 최소 10 cm 내외로 발생하였다. 시나리오 2와는 다르게 시나리오 3은 홍수위 상승현상은 다기능보의 배수효과에 의한 것으로 판단된다. 홍수위의 단차가 발생하는 지점은 다기능보 직상류에 하상저하가 급격하게 발생하는 지점과 일치함에 따라 하상변동에 따른 단차로 판단된다.

시나리오 4에 따른 하상변동 결과를 이용한 홍수위 분석 결과, 세종보 상류에서의 홍수위 상승이 최대 2.23m까지 발생하는 것으로 나타났다(Fig. 4(d)). 공주보 상류에서는 0.77 m, 백제보 상류에서는 0.19 m의 홍수위가 상승하는 것으로 나타났다. 홍수위가 다기능보의 상류부에서 상승하는 이유는 시나리오 3과 동일한 것으로 판단된다. 다만, 시나리오 3에 비해서 세종보 상류에서는 홍수위 상승이 과대하게 발생하고, 공주보 상류는 과소하게 나타나는 것은 하상변동 모의결과에 의한 것으로 판단된다. 세종보의 상류부에서의 하상상승량이 시나리오 3보다 크기 때문에 하상경사가 시나리오 3에 비해서 완경사를 이루었으며, 공주보 상류에서는 하상변동이 시나리오 3보다 작아 기존의 완경사를 유지한 결과라고 판단된다.

시나리오 5에 따른 하상변동 결과를 이용한 홍수위 분석 결과, 세종보 상류에서만 홍수위 변화가 최대 1.16m 상승하고 그 외의 구간에서는 홍수위의 변화가 1cm 내외로 거의 변동하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 4(e)). 시나리오 5의 경우에는 하상변동이 세종보 상류구간에서만 발생하였으므로 세종보 상류에서만 수위변화가 발생한 것으로 판단된다. 그리고 시나리오 3, 4와 같은 이유인 하상저하에 따른 완경사 형성으로 배수곡선이 발생한 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 1차원 하상변동 모형인 HEC-RAS를 이용하여 금강의 세종보, 공주보, 백제보 설치 전·후와 각 다기능보의 수문운영 시나리오에 따른 하상변동 양상을 모의하였다. 하상변동 양상분석을 위하여 최심하상고와 평균하상고, 연평균하상고를 비교·검토하였으며, 최심하상고와 연평균하상고를 이용하여 다기능보의 수문운영에

따른 하상변동 양상을 분석하였다. 또한 하상변동 이후의 하상을 이용하여 홍수위 분석을 실시하였다. 본 연구에서 도출할 수 있었던 결론은 다음과 같다.

- 1) 현재 하천설계기준(KWRA, 2009)에서 제시하고 있는 평균하상고 개념을 도입하여 하상변동을 분석할 경우에는 기준수위를 결정함에 있어서 주의를 기울여야 한다. 현재 하천설계기준(KWRA, 2009)에서는 기준수위나 계획홍수위를 사용하여 평균하상고를 결정하도록 권하고 있으나, 계획홍수위를 이용하여 실제 금강유역에 적용한 결과 하상고가 다기능보 마루보다 높게 나타났다. 이러한 경우에는 하상변동 양상을 분석하기에는 부적합하므로 기준수위를 이용하여야 하지만, 현재 기준수위에 대한 명확한 정의가 없는 상태이다. 따라서 본 연구에서는 1년 빈도 홍수량을 이용해 산정한 연평균하상고를 사용하였다.
  - 2) 금강에 다기능보가 설치되기 전에는 세종보 상류에서 발생하는 하상저하를 제외하고는 대부분의 하상변동이 약 0.03m 내외로 안정하상의 양상을 나타내었다. 그러나 최심하상고의 변화는 상류에서 공주보 위치까지 발생하는 것으로 나타났다.
  - 3) 다기능보가 설치된 금강에서는 하상변동이 전 구간에 걸쳐서 발생하였으며, 세종보와 공주보의 경우에는 직상류에서 하상저하가 발생하고, 하상저하가 발생하는 상류구간과 다기능보 하류구간에서는 하상상승이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 다기능보의 영향으로 인한 유사퇴적 및 수문개방에 따른 배사, 배사에 의해 제거된 유사 하류에 재퇴적되어 발생하는 것으로 판단된다.
  - 4) 하상변동 모의를 통해서 획득한 미래의 하상을 이용하여 홍수위 분석을 한 결과, 다기능보의 수문운영 시나리오 중 가동보를 개방하는 모든 시나리오에서 수위가 상승하는 현상이 발생하는 것은 하상변동에 따른 배수효과에 의한 것으로 판단되며, 홍수위 상승의 영향 등을 고려하여 하상고 관리 및 유사관리가 이루어져야 할 것으로 판단된다.
  - 5) 본 연구의 대상구간인 금강본류에 위치하는 제방은 하천설계기준(KWRA, 2009)에서 제시하고 있는 1.5 m의 여유고를 확보하여야 한다. 하상변동 및 홍수위 모의결과, 홍수위 상승량이 여유고 권장량을 상회하는 시나리오가 있으므로, 홍수위 상승을 고려한 유사관리가 이루어져야 한다고 본다.
- 본 연구에서는 다기능보의 설치에 따른 장기하상변동

양상을 검토하였으며, 다기능보 설치 후 수문운영에 따른 장기하상변동 양상을 비교·분석하였다. 분석결과, 다기능보의 수문운영에 따라 하상변동의 양상이 변화되며, 하상변동의 차이로 인해서 홍수위 변동 폭에 차이가 있음을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 향후 하천계획을 수립함에 있어서 중단적 하도관리 및 안정하상 채택 등을 위해서 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 연구에서는 유역에서 발생하여 하천으로 유입되는 유사량은 고려하지 않았으므로, 실제 하상변동량이 과소하게 산정되었을 우려가 있으므로, 하상상승이 더 많은 지점에서 발생할 가능성이 있다. 이러한 이유로 국내 하천관리측면에서는 과거에 하천에서는 잘 사용하지 않았던 유지준설이 도입될 가능성도 있을 것으로 판단된다. 따라서 향후에는 하상변동과 여유고 분석을 통하여 장기적인 하천관리측면에서 준설이 필요할 것으로 판단되는 지점 및 시기를 산정하고자 한다. 본 연구에서는 4대강 살리기 사업 이후의 하상단면이 공개되지 않고 있어 추가분석을 수행하지 못하였으나, 추후 실측자료 입수 등을 통하여 연구결과에 대한 추가분석을 수행하고자 한다. 또한 실제 다기능보 운영률 및 개도율을 반영한 하상변동 및 홍수위 변화를 모의하고, 유속 등에 대한 추가분석을 실시하고자 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(11기술혁신C06)에 의해 수행되었습니다.

## References

- Ahn, J.M., and Lyu, S. (2013). "Analysis of flow and bed change on hydraulic structure using CCHE2D: focusing on Changnyong-Haman." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 46, No. 7, pp. 707-717.
- Choi, M., Lee, S.O., Ahn, J.H., and Yoon, Y.N. (2008). "An analysis of long-term river bed changes using surface-water modeling system (SMS) model: a case study of Pochon stream basin." *Journal of KOSHAM*, KOSHAM, Vol. 8, No. 2, pp. 139-147.
- Chung, S.Y., Park, B.J., and Jung, K.S. (2006). "A study on the applicability of GSTAR-1D to the riverbed-level variation in the Geum river." *Proceedings of the KWRA Conference*, pp. 1611-1615.
- Jang, C.L., and Woo, H. (2009). "Analysis of bed material changes by flushing flow from Daecheong dam." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 42, No. 10, pp. 845-855.
- Ji, U., Son, K.I., and Kim, M. (2009). "Numerical analysis for bed changes in the upstream channel due to installation of sediment release openings in the flood control dam." *Journal of KWRA*, KWRA, Vol. 42, No. 4, pp. 319-329.
- K-water. (2012). *Dam operational practices handbook*. KWRA (Korea Water Resources Association) (2009). *Standard and commentary of river design*.
- MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2009). *Geum river basin master plan (Changed)*.
- MLTMA (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs) (2010). *Annual hydrological report on Korea*.
- MOCT (Ministry of Construction and Transportation) (2006). *Survey report of Geum river basin*.
- NIER (National Institute of Environmental Research) (2010). *The prediction of riverbed change, sediments and dredging period after building hydraulic structures in the Geum river*, 2010-91-1266.
- Shen, H.W. (2010). "Flushing sediment through reservoirs." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 37, No. 6, pp. 743-757.
- Son, A., Han, K., and Kwon, T. (2013). "The study of bed change and stability depending on hydraulic structure." *Journal of KOSHAM*, KOSHAM, Vol. 13, No. 3, pp. 157-166.
- USACE (US Army Corps of Engineers). (2010). *HEC-RAS river analysis system user's manual version 4.1*, CPD-68, California, pp. 623-631.
- Wang, Z.Y., Wu, B., and Wang, G. (2007). "Fluvial processes and morphological response in the Yellow and Weihe river to closure and operation of Sanxia dam." *Geomorphology*, Elsevier, Vol. 91, pp. 65-79.
- Wu, B., Wang, G., and Xia, J. (2007). "Case study: delayed sedimentation response to inflow and operations at Sanmenxia dam." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 133, No. 5, pp. 482-494.
- Yeon, K.S., Jeong, S.M., Yun, C.Y., Lee, J.H., and Shin, K.S. (2009). "A riverbed change prediction by river-crossing structure-focused on the major river reaches

of the multifunctional administrative city-.” *Journal of KOSHAM*, KOSHAM, Vol. 9, No. 1, pp. 107-113.

Yu, K. (2011). “New concept of average river bed and general trend of river bed change in the Nakdong river.” *Journal of KCA*, KCA, Vol. 11, No. 6, pp. 486-494.

Ziegler, C., and Nisbet, B. (1995). “Long-term simulation of fine-grained sediment transport in large reservoir.”

*Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 11, pp. 773-781.

paper number : 14-121

Received : 4 December 2014

Revised : 30 December 2014 / 3 April 2015

Accepted : 3 April 2015