

## 바닥보호공 설치에 따른 하상변동 특성 분석

손아롱\* · 김병현\*\* · 문보람\*\*\* · 한건연\*\*\*\*

Son, Ah Long\*, Kim, Byung Hyun\*\*, Moon, Bo Ram\*\*\*, Han, Kun Yeun\*\*\*\*

## An Analysis of Bed Change Characteristics by Bed Protection Work

### ABSTRACT

This study presents the analysis of flow and bed change characteristics considering bed protection work built on the immediate downstream of weir to protect river bed from scouring. The study area is 37km reach from Hyunpoong station to Masuwon station including Hapcheon- Changyoung multi-function weir in the Nakdong river. CCHE2D model is calibrated and validated for evaluating the flow and bed change characteristics during Typhoon Kompasu in 2010. Three simulation conditions are set up: Case 1 is a natural channel without installation of weir. Case 2 involves an installation of weir in the natural channel. Case 3 involves an installation of weir with bed protection in the natural channel. Flood frequency (50, 100 and 200yr) is applied to each scenario to analyze the effects of bed protection work. While the sediment rate is increased in the downstream of fixed gate and sluice-type gate, river bed scouring rate is increased in the downstream of lift-type gate in Case 2 comparing with the results of Case 1. The river bed scouring is not occurred in the immediate downstream of weir (~30m) due to the effect of bed protection, but larger amount of sediment is occurred in the downstream of weir (60m~) which the bed protection is not installed comparing with the results Case 1. Through the results of simulation considering bed protection work, this study would be helpful to expect bed change and operate the weir as well as manage.

**Key words** : Bed Protection, Multi-Function Weir, Bed Change, CCHE2D

### 초록

본 연구에서는 세굴방지를 위하여 설치된 바닥보호공의 영향을 고려한 흐름특성 및 하상변동에 관한 연구를 수행하였다. 대상지역은 낙동강 유역의 합천창녕보가 포함된 현풍 수위관측소에서부터 마수원 수위관측소까지의 구간이며, CCHE2D 모형을 적용하기 위하여 2010년 태풍 '곶파스'사상을 대상으로 검·보정하였다. 바닥보호공에 대한 영향을 분석하기 위하여 빈도별 호우사상(50년, 100년, 200년)에 대해 세 가지의 모의조건(Case 1, 2, 3)을 구성하였으며, Case 1은 보가 설치되기 이전의 조건, Case 2는 보가 설치된 이후의 조건, Case 3은 바닥보호공을 고려한 조건이다. 보의 설치로 인하여(Case 2) 고정보 및 전도게이트형 가동보 구간에는 퇴적량이 증가하였고, 리프트게이트형 가동보 구간은 높은 수위차로 인하여 보를 건설하기 이전(Case 1)보다 더 많은 세굴이 발생하였다. Case 3은 바닥보호공의 영향으로 보 직하구간(30m)에서 세굴이 발생하지 않았다. 그러나 바닥보호공이 설치되지 않은 보 하류구간(60m 이상)에서는 보가 설치되기 이전 조건(Case 1)보다 더 많은 세굴이 발생하였다. 이와 같은 결과를 통하여 본 연구결과는 실제 보에 대한 하상변동 예측과 보의 관리 및 운영에 대한 도움을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

**검색어** : 바닥보호공, 다기능보, 하상변동, CCHE2D

\* 경북대학교 박사 (Kyungpook National University · sonahlong@gmail.com)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 경북대학교 연구교수 (Corresponding Author · Kyungpook National University · bhkimc@gmail.com)

\*\*\* 현대건설 사원 (Hyundai Engineering & Construction · evanboram@naver.com)

\*\*\*\* 정회원 · 경북대학교 건설환경에너지공학부 교수 (Kyungpook National University · kshanj@knu.ac.kr)

Received December 11, 2014/ revised June 14, 2015/ accepted June 22, 2015

## 1. 서론

매년 반복되는 홍수와 가뭄에 대비하여 안정적으로 수자원을 확보하기 위해 정부의 주도하에 4대강 살리기 사업이 추진되었다. 이 사업의 일환으로 하천 준설 및 다기능보 건설 등의 계획이 수립되었으며 실제 낙동강의 준설규모는 약  $3.4 \times 10^8 \text{m}^3$ 로 상주부근(낙동수위관측소)의 경우 수위변화가 최대 3.5m나 저감될 만큼의 양이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2011). 준설로 인하여 하천의 평형상태가 파괴되고 다시 평형상태로 복원하는 과정에서 침식과 퇴적이 반복적으로 발생하여 하상이 변동될 뿐만 아니라 보의 건설로 인하여 그 과정이 가속화될 것으로 예상된다. 특히, 보 직하류부의 침식은 보 붕괴로 이어져 대규모의 홍수를 유발시킬 수 있기 때문에 보의 안정성 및 인근 주민의 생명 그리고 재산상의 피해와 직결되는 중요한 문제이기 때문에 침식작용을 완화하기 위한 대책이 필요하다. 바닥보호공은 하상경사를 완하시켜 하상에 작용하는 소류력을 줄임으로써 세굴을 방지하고 수공구조물이 상류에 설치되면 토사 공급이 감소되어 나타나는 하상 저하 및 수공구조물의 설치로 인한 유속의 변화로 발생하는 국부적인 세굴 등 이로 인한 구조물의 붕괴를 방지하기 위하여 설치된다.

위와 같은 준설 및 다기능보의 건설로 인한 하천에서의 유사이송 및 하상변동에 관한 연구방법으로는 현장측정을 통한 분석, 수리모형 실험 그리고 수치모형 실험이 있다(Ji, 2010). Wu et al.(2000)은 유사량 산정을 위해 개발한 공식을 여러 하천에서 측정한 유사량, 실험실에서 측정한 유사량 그리고 다른 연구자들에 의해 개발된 유사량 계산 공식들로부터 산정된 유사량과 비교함으로써 개발 공식을 검증하는 연구를 수행하였다. Jung(2011)은 보 하류부 하상보호공 길이를 산정하기 위하여 실제하천과 유사한 모형수로에 다기능보를 설치하고 수리학적 특성과 하상변동을 관측하는 실험연구를 수행하였다. 이와 같이 현장측정 혹은 수리모형 실험의 경우, 실제 하상의 조건을 반영한다는 점에서 자연현상의 왜곡을 최소화하여 신뢰성이 높지만 많은 시간과 비용이 소요된다. 또한 현장측정을 통한 분석은 모든 지점에 대한 측정이 어렵기 때문에 대표성을 가지는 지점을 선정해야 하고 수리모형 실험은 원형에 대해 모형 법칙 적용에 따라 정확성이 달라질 수 있는 단점을 내포하고 있다. 반면, 수치모형 실험은 지배 방정식의 한계 및 반복적인 수치계산상의 오류가 발생할 수 있지만, 타 방법들에 비해 사공간적 제약에서 벗어나 실제하천에 대한 정보를 통하여 정밀하게 모의를 실시할 수 있다(Ji, 2010).

수치모형 실험을 통한 유사이송 및 하상변동에 관한 연구는 과거부터 활발하게 이루어져 1차원 모형인 HEC6, GSTAR-1D에서부터 RMA2, CCHE2D 등과 같은 2차원 수치해석모형이 개발되

었으며, EFDC, FLOW3D와 같은 3차원 수치해석모형에 대한 연구가 이뤄지고 있다. 과거에는 자연 상태의 하상변동에 관한 1차원 해석 연구가 주를 이루었으나 최근에는 자연 상태의 하천뿐만 아니라 수공구조물과 같은 흐름을 방해하는 요소에 따른 2차원 및 3차원적 하상변동 및 국부세굴에 대한 연구를 주로 수행하고 있다. Son et al.(2014)은 HEC6의 기능이 탑재된 HEC-RAS 모형과 CCHE2D 모형을 적용하여 국내 지방하천의 하상변동 특성에 관한 연구를 수행하였으며 경험적 유사량-유량 공식과 비교분석하였다. 수공구조물에 따른 하상변화에 관한 연구로는 Shin and Pierre(2009)는 합천댐의 건설로 인한 하류 하천지형의 변화 예측을 GSTAR-1D모형을 적용하여 분석하였으며, Park et al.(2007)은 중소규모의 댐 계획 및 운영과 저수지의 퇴사관계를 이해하기 위해 저수지로 유입되는 유사량을 SED-2D모형에 적용하여 산정하였다. Jang et al.(2013)은 창녕함안보의 설치로 인한 상류 하상안정화방안을 검토하기 위해서 CCHE2D모형을 적용하여 보 상류에서의 흐름 및 하상변동 분석을 실시하고, 하상 안정화 방안에 따른 정량적인 평가 및 비교를 수행하였다. Ahn and Lyu(2013)는 창녕함안보를 대상으로 CCHE2D 모형을 이용한 흐름 및 하상변동에 관한 연구를 수행하였으나 바닥보호공 제원을 반영하지 않았다. 수치해석기법을 통한 정밀한 하상변동 해석을 수행하기 위해서는 바닥보호공과 같은 수공구조물을 포함하는 실제하천에 대한 정확한 제원의 적용이 해석결과에 대한 신뢰성 확보에 필수적임에도 불구하고, 수치모의해석을 위한 여러 가지 제약조건 등의 이유로 이러한 수공구조물을 반영하지 않는 경우가 많다. 국토교통부는 보 상·하류 구간에 대한 하상변동의 추이를 4대강 살리기 사업 이후 지속적으로 모니터링하고 있어 현장 관측자료를 바탕으로 유사이송과 하상변동을 분석하는 방법을 직접 수행할 수 있으나, 모니터링 시스템 개발에 따른 신뢰성 검증이 이뤄지지 않은 상황에서 현장관측자료를 통한 분석은 많은 문제점을 야기할 수 있기 때문에 사전에 수치모형을 이용한 검토가 필요하다(Ahn and Lyu, 2013).

따라서 본 연구에서는 앞서 언급한 2가지의 한계점을 극복하고자, 2차원 수치모형 중의 하나인 CCHE2D 모형을 이용하여 낙동강 유역의 다기능보에 설치된 바닥보호공의 영향을 고려한 하천 흐름 양상 및 하상변동에 관한 해석을 수행하였다. 대상 다기능보는 합천창녕보로 선정하였으며, 모의구간은 합천창녕보 상류에 위치한 현풍 수위관측소부터 하류에 위치한 마수원 수위관측소까지로 선정하였다. 그리고 2010년 8월 30일~9월 6일에 발생한 태풍 ‘곶파스’사상을 적용하여 현장관측치와 비교를 통하여 모형의 적용성을 검증하였으며, 매개변수와 반응상수를 시행착오법으로 보정하였다. 보 설치 전 및 보 설치 후(바닥보호공 미설치) 그리고 바닥보호공 설치 후의 세가지 조건에 대한 모형 및 입력자료를

구성하고 최적화된 매개변수를 적용하여 빈도별 홍수량에 따른 흐름 및 하상변동을 분석하였다. 이를 바탕으로 본 연구는 실제 보에 대한 하상변동 향후 예측과 관리 및 운영에 대한 정보를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 연구방법

### 2.1 대상구간 선정

합천창녕보는 좌안인 경상남도 창녕군 이방면 등림리와 우안인 합천군 청덕면을 가로질러 위치하고 있으며, 흐름 및 하상변동 분석을 위한 모의구간은 합천창녕보 상류에 위치한 대구광역시 달성군 현풍면 성하리 현풍휴게소 뒤에 있는 현풍 수위관측소부터 해당 보 설치지점의 하류에 위치하는 경상남도 의령군 낙서면

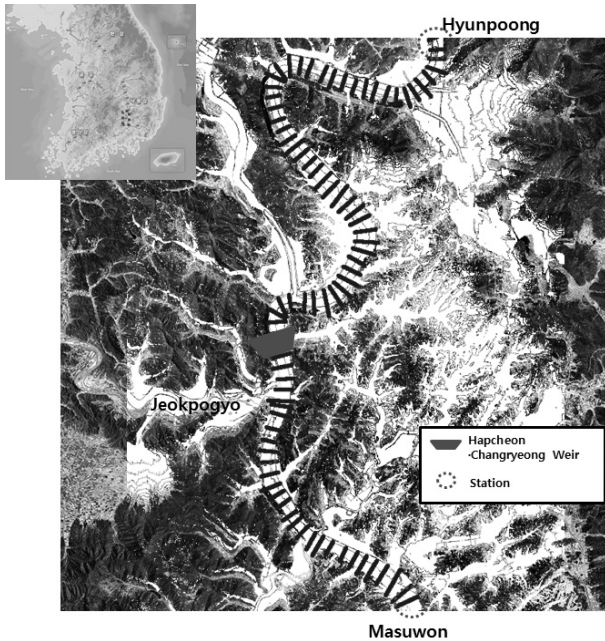


Fig. 1. Study Area (Location of Hapcheon-Changryeong Weir)

여의리 마수원 수위관측소까지로 약 37km 구간이다. 적용대상구역의 위성사진은 Fig. 1에 제시하였다. 본 연구에서 37km 라는 상대적으로 긴 구간을 적용대상구간으로 선정한 이유는 상·하류단의 경계조건이 보가 위치한 지점에 수리 및 하상변동에 영향을 줄 가능성을 배제하기 위함이다. Fig. 2는 합천창녕보의 조감도와 평면도를 나타낸 것이다.

합천창녕보는 총 연장이 328m로 고정보 구간 110m, 가동보 구간 218m로 구성되어 있다. 가동보 구간은 수문형 게이트(리프트형)와 복합형 게이트(전도형)를 포함하고 있으며, 수문형 게이트는 각 40m의 수문이 총 3련으로 120m, 복합형 게이트는 각 40m의 수문이 총 2련으로 80m, 수문기둥은 폭 3m의 6개소로 18m이다. 상류측 관리수위는 EL. 10.5m, 하류측 관리수위는 EL. 5m이며, 고정보의 높이는 EL. 8m, 전도형 수문은 1m, 리프트형 수문은 9m이다(Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, 2009a).

### 2.2 입력자료의 구성

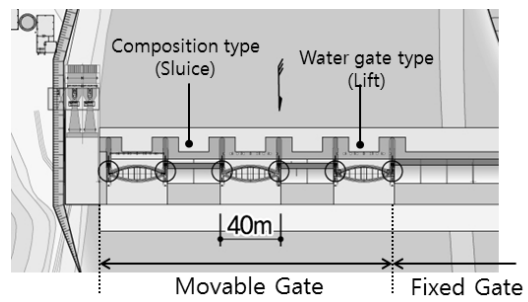
보 및 바닥보호공과 같은 수공구조물의 설치에 따른 흐름 및 하상변동 모델링을 수행하기 위해서는 모의 구간 내 지형 형상 구축, 상·하류단의 경계조건(유량 및 유사량) 선정 그리고 하도구간의 수리학적 특성을 실제와 가깝도록 반영하기 위한 매개변수의 선정 과정이 필요하다

#### 2.2.1 지형자료 구축

본 연구에서는 먼저 대상구간의 지형자료를 구축하기 위해서 1:25,000의 수치지도를 TM좌표계를 가진 Shape file로 변환하였고, 수치지도상에 제외지 구간에 대한 측정자료가 충분하지 않아 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009b)에서 제시한 측정자료를 활용하였다. 본 연구에서는 이러한 수집 지형자료와 GIS tool을 사용하여 불규칙삼각망(TIN)을 생성하였고, 생성된 TIN을 바탕으로 대상구간내 Grid를 추출하고 마지막으로



(a) Landscape



(b) Sectional Plane

Fig. 2. Hapcheon · Changryeong Weir (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs 2009a)

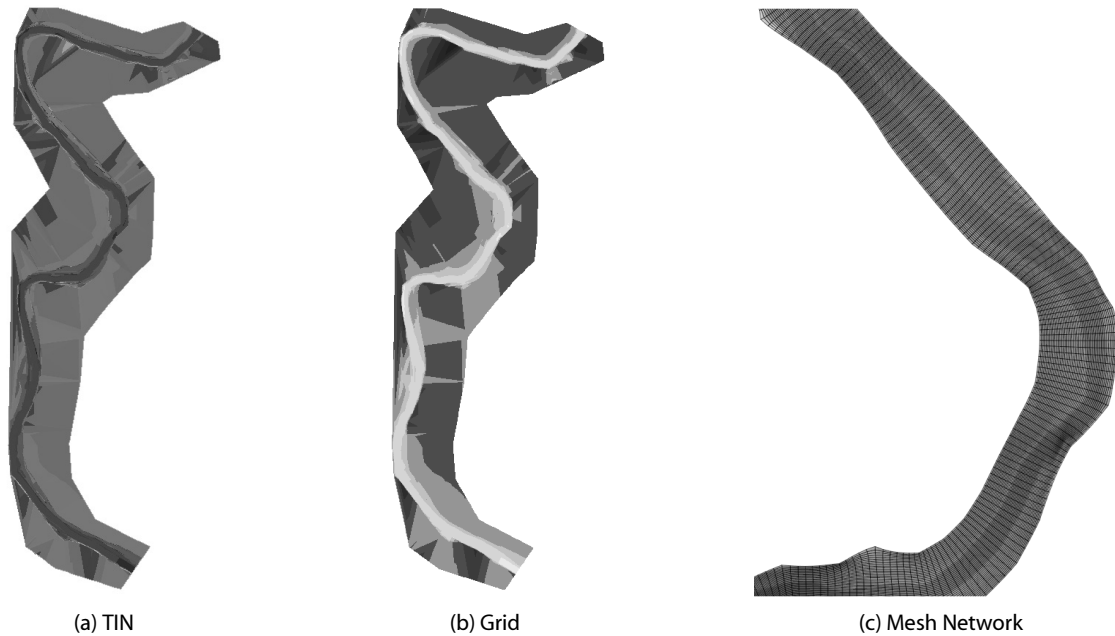


Fig. 3. The Process of Mesh Generation

Table 1. Grain Size Distribution at Each Measure Station

Station	Gravel			Sand		Silt and Clay
	Coarse Gravel	Intermediate Gravel	Fine Gravel	Coarse Sand	Fine Sand	
	19.0mm above	19.0~4.72mm	4.76~2.0mm	2.0~0.425mm	0.425~0.075mm	0.075mm below
No.316(L)	0	15.8	1.4	5.6	59.2	18
No.308(R)	0	0	0	25.6	73.4	1
No.300(R)	12.8	21.9	2.7	25.7	35.2	1.7
No.292(R)	17.1	3.9	1	5.5	31	41.5
No.284(R)	31.7	4.8	1	24.4	36.2	1.9
No.276(R)	0	0	0.2	21.6	75.1	3.1
No.268(L)	0	1.6	2.6	40.9	52.3	2.6
No.260(L)	0	0	0	10	86.9	3.1
No.252(R)	0	0	0	6	43.5	50.5
No.244(R)	0	0	0.2	38.5	59.6	1.7
No.236(L)	0	0	0	2.9	45	52.1

CCHE2D Mesh Generator를 이용하여 계산격자를 구축하였다 (Fig. 3). 본 연구는 전체 대상구간에 대한 수리 및 하상변동을 분석하고자 하는 것이 아니라 보와 바닥보호공의 영향을 분석하고자 하는 것이므로 계산격자 구축시 전구간을 동일한 간격으로 설정하는 것은 비효율적이라 판단하였다. 따라서 보건설 위치를 기준으로 상류 1km와 하류 2km에 이르는 구간에 대해서는 좀 더 조밀한 계산격자를 사용하여 보와 바닥공의 영향을 분석하였다. 격자 크기에 대한 검토정은 2.3장에서 구체적으로 기술하였다.

### 2.2.2 매개변수 선정

하천의 수리학적 특성은 조도계수, 동점성계수, 하상을 구성하는 입자의 분포 등과 같은 매개변수를 통하여 모델링에 반영된다. 하천의 난류특성을 반영하기 위해 해의 수렴 측면에서 안정적인 특성을 가지는  $k-\epsilon$  model을 적용하였고 wall slipness coefficient는 0.002, 민감도가 작은 von Karman 상수는 0.41의 기본값을 적용하였다(Wu, 2001). 대상구역의 하상재료는 현장조사가 뒷받침된 Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2009b)

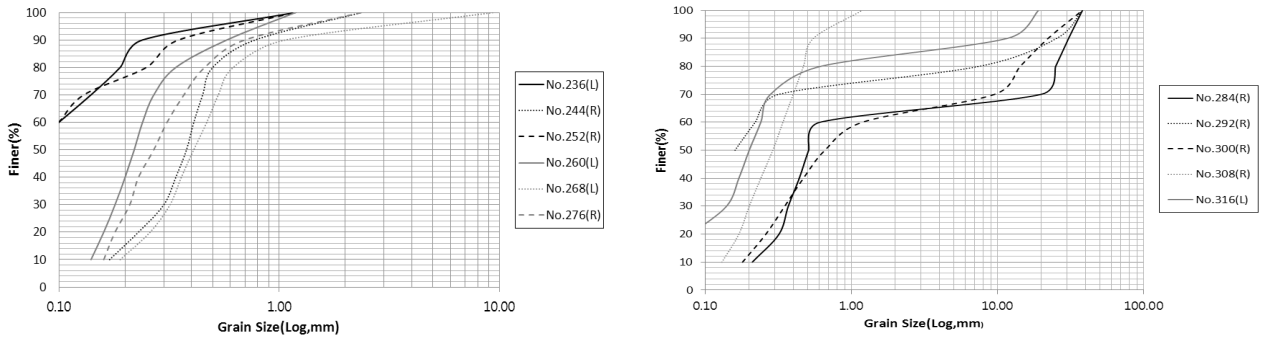


Fig. 4. Grading Curve at Each Measure Station

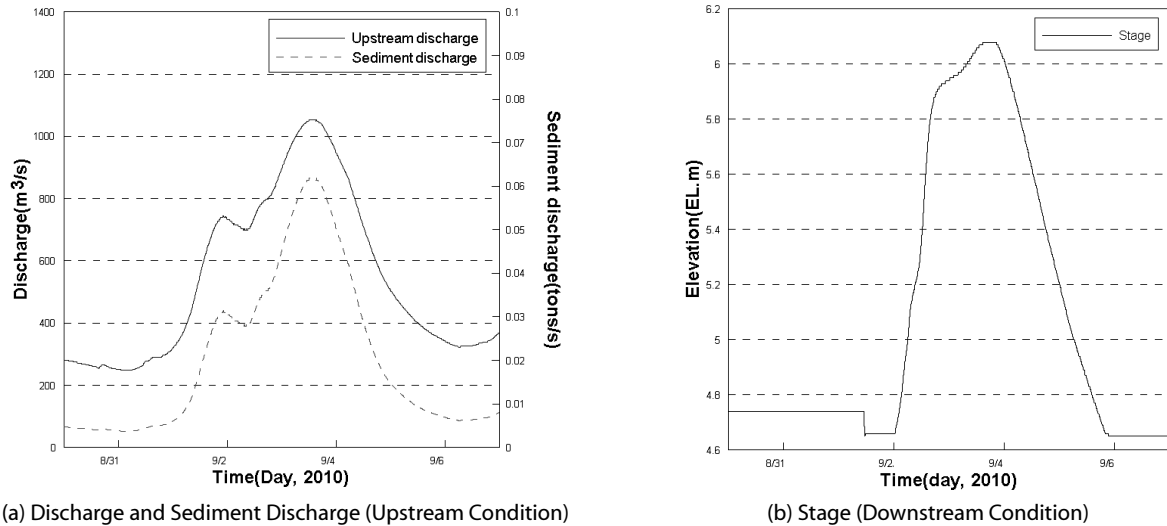


Fig. 5. Upstream and Downstream Boundary Condition

의 자료를 바탕으로 본 연구에 적합한 입력 자료의 형태로 구성하기 위하여 입자의 크기를 6단계로 분류하였다. Table 1에서 보여주듯이, 0.075mm 이하(대표입경: 0.075, 실트 및 점토입자), 0.075~0.425mm(가는 모래), 1.2125mm(굵은 모래), 3.38mm(작은 자갈), 11.88mm(중간 자갈) 그리고 19mm(굵은 자갈)의 6단계로 구성하였고, 각 측정위치의 입경별 분포비율을 기준으로 토양층을 구성하였으며 공극율은 0.4로 하였다. Fig. 4는 각 측정별 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 위에서 언급한 매개변수 중에서 조도계수는 하천의 여러 가지 수리계산을 실시할 때 가장 중요한 요소이다(Korea Water Resources Association, 2009). 따라서 본 연구에서는 조도 계수에 대한 검·보정을 수행하였다. 부분에 대한 방법과 결과는 다음 장(수치모형의 검·보정)에서 구체적으로 설명하였다.

2.2.3 경계조건 선정

마지막으로 모의구간 상류단 경계조건 중 유량은 현풍 관측소에서 관측된 수위와 수위-유량 관계식을 통하여 산정하였으며, 유수량

은 대상구간 내에 위치하고 있는 왜관 관측소 유량-유수량 관계식을 통하여 계산하였다. 왜관지점의 유량-유수량 관계식은 Eq. (1)과 같으며 결정계수가 0.94로 낙동강 유역 내 다른 지점의 유량-유수량 관계식 중에서도 상당히 높은 값을 보이고 있다(Fig. 5(a)).

$$Q_{TS} = 0.0069 Q^{1.9482} \tag{1}$$

여기서,  $Q_{TS}$ 는 총유수량(tons/day),  $Q$ 는 유량( $m^3/sec$ )을 의미한다. 홍수시 하천에서 소류수량을 직접 측정하는 것은 매우 어렵기 때문에 측정 부유수량만이라도 존재하는 경우에는 일반적으로 수정이인슈타인 절차(Modified Einstein Procedure, MEP)와 같이 측정된 부유수량으로부터 소류수량을 추정하는 방법을 적용한다. 하지만 본 연구에서는 측정된 부유수량도 존재하지 않으므로, 하천 내에서의 소류수량은 부유수량의 약 5~25% 정도라고 제안한 Yang (2003)이 제안한 방법을 적용하였다. 또한 본 연구에서 적용한 사상은 홍수수사상으로 홍수시에는 부유사 이송형태가 지배적이기

때문에 소류사량은 부유사량의 5%로 가정하였다. 하류단 경계조건은 마수원 관측소의 관측 수위를 적용하였으며(Fig. 5(b)), 현풍, 마수원의 관측소 위치는 그림 Fig. 1에서 확인할 수 있다.

### 2.3 수치모형의 검보정

본 연구에서 적용한 CCHE2D모형에 대한 격자의 수렴성(Mesh Convergence) 확인과 매개변수의 검·보정을 위해 태풍 ‘곶파스’ 사상(2010년 8월 30일~9월 6일)을 이용하였다. 현풍관측소에서 관측한 수위정보를 이용하여 상류단의 유량과 유사량에 관한 경계조건 설정 및 마수원관측소의 수위 실측자료를 이용하여 하류단 경계조건을 설정하였으며, 모형의 검증을 위하여 국토교통부에서 운영하는 적포교 수위관측소의 실측자료를 활용하였다.

격자의 수렴성 확인과 매개변수의 검·보정을 위해 적포교 수위 관측소 지점에서 관측한 값과 모의 결과 사이의 절대값 평균오차 ( $L_1$ , Eq. 2)와 평균제곱근 오차(RMSE, Eq. 3)를 계산 하였다.

$$\|e\|_{L_1} = \frac{1}{m} \left( \frac{1}{\psi_{\max}} \sum_{i=1}^m |e_i| \right) \quad (2)$$

$$\|e\|_{RMSE} = \left[ \frac{1}{m} \left( \sum_{i=1}^m |e_i|^2 \right) \right]^{1/2} \quad (3)$$

여기서,  $e_i = \psi_i - \hat{\psi}_i$ 이고  $\psi_i$ 는 모의치,  $\hat{\psi}_i$ 는 관측치,  $\psi_{\max}$ 는  $\psi_i$ 값을 정규화하기 위한  $\psi_i$ 의 최대값이고  $m$ 은 자료수를 의미한다.

#### 2.3.1 격자의 수렴성(Mesh Convergence)

하상변동에 대한 2차원 수치모의를 위한 격자의 구축과정에서 너무 해상도가 낮은 격자를 적용할 경우, 실제지형이 2차원모형을 수행하기 위한 형태로 변환되는 과정에서 누락되거나 오류가 생길 수 있다. 하지만 이런 문제를 해결하기 위해 단순히 격자를 조밀하게 구성하는 경우, 계산기법의 오차와 프로세서의 성능에 따라 모의시간이 비효율적으로 증가하는 문제가 발생하기도 한다. 따라서 본 연구에서는 대상유역에 대한 격자 수렴성(Mesh Convergence) 확인을 위해, 5가지의 해상도에 따른 격자를 구성하고 각 격자에

Table 2. Measurement Error Analysis According to the Number of Mesh

The Number of Mesh	$L_1$	RMSE (m)
570	$3.32 \times 10^{-2}$	$4.23 \times 10^{-2}$
2280	$2.84 \times 10^{-2}$	$3.71 \times 10^{-2}$
9120	$2.69 \times 10^{-2}$	$3.49 \times 10^{-2}$
36480	$2.62 \times 10^{-2}$	$3.31 \times 10^{-2}$
145920	$2.61 \times 10^{-2}$	$3.28 \times 10^{-2}$

다른 모형의 정확성을 조사하였다.

본 연구에서는 보구간 내 해상도에 따라 총 격자의 수가 570, 2280, 9120, 36480, 145920인 5가지의 격자를 구성하였다. 그리고 각 격자를 적용하여 계산한 수위와 적포교 수위표의 실측수위와의 오차를 계산하고 비교해 본 결과(Table 2), 9120개 이상의 계산격자 사용에서는 오차의 변화가 크지 않은 것을 확인할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 적용 모형의 정확성과 효율성을 모두 반영하기 위해서 9120개 보다 한단계 위인 36480개의 계산격자를 채택하였으며, 이 격자에 대한 평균 해상도는 8m이다.

#### 2.3.2 조도계수 검·보정

흐름과 하상변동에 가장 큰 영향을 미치는 매개변수인 조도계수에 대한 검·보정을 수행하였다. River Schematic Design(2009)에

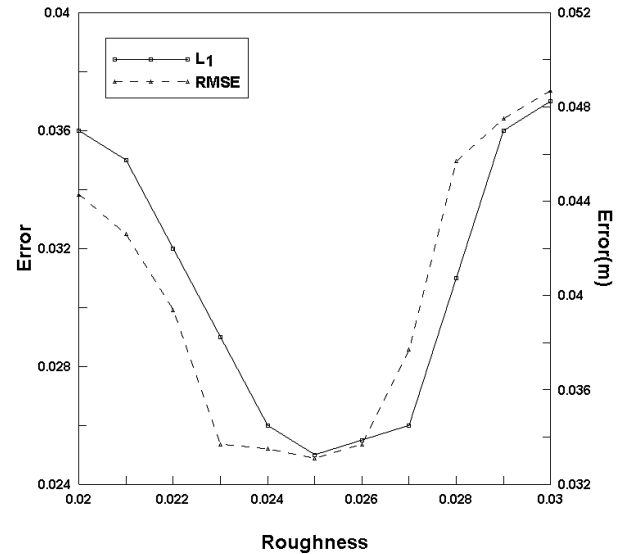


Fig. 6. Measurement Error Analysis According to Roughness

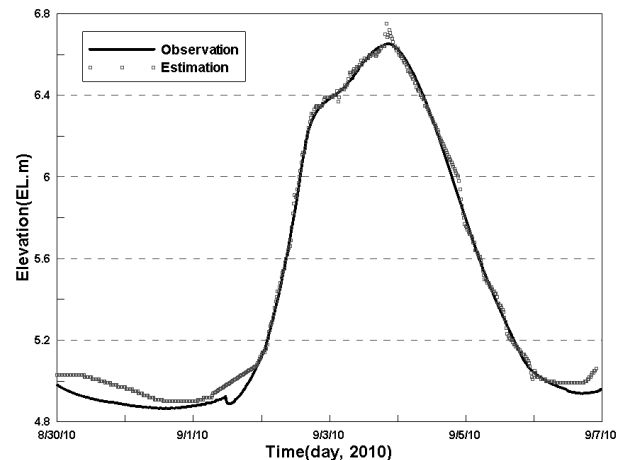


Fig. 7. Comparison of Observation and Estimation

제시된 조도계수 0.023을 비롯하여 조도계수 0.02~0.03에 대하여 0.001간격으로 비교하였으며, 그 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 실측치와 계산치의 오차분석에서 최저치를 보인 조도계수 0.025를 채택하였으며, Fig. 7는 적포교 수위관측소에서의 실측수위와 조도계수 0.025를 적용한 모의 해석결과로 나타난 수위를 비교한 것이다.

### 2.3.3 세굴심 비교

Nakdong River First Region Special Investigation Group (2012)에 따르면 보 상하류부에 5~10m 깊이의 세굴이 발견되었으며 평균 세굴깊이가 약 7.5m에 이른다고 보고되어 있다. 또한, 가동보 하류 30m 지점부터 세굴이 시작되어 하류로 400m까지 세굴이 진행되었고 세굴폭은 약 160m, 최대 세굴심도 가동보 하류로 약 100m 지점에서 발생한 것으로 추정된다(Nakdong River 1 Region Special Investigation Group). 본 연구의 감·보정 결과 보 상하류부에 4.7~9m의 세굴이 나타났으며 평균깊이는 약 7.2m에 이르는 것으로 나타났다. 가동보로부터 하류로 약 360m에 이르는 거리까지 세굴이 진행된 것으로 산정되었다. Fig. 8은 보 하류 최대세굴이 발생한 단면과 종단세굴심도를 보여주고 있다.

## 3. 바닥보호공 설치를 고려한 수리해석

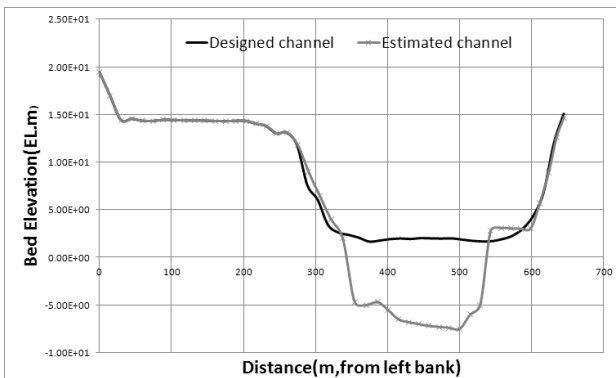
본 연구에서는 하상 준설과 보 설치로 인한 하상의 변화를 예측하기 위하여 합천창녕보 포함된 37km 모의구간을 설정하고 계산격자를 구성하였으며, 최종적으로 바닥보호공을 고려한 하상변동 모의를 수행하였다. 대규모 준설작업으로 인해 변화된 하상은 홍수시 가동보의 개방으로 인하여 막대한 유량 집중과 빠른 유속으로

세굴현상이 발생할 것으로 예상된다. 바닥보호공은 유속을 약화시켜 하상의 세굴을 방지하고 보의 본체 및 물받이를 보호하기 위하여 설치하였으며, 일반적으로 이용되고 있는 재료는 콘크리트 블록, 사석, 돌망태 등이 있다.

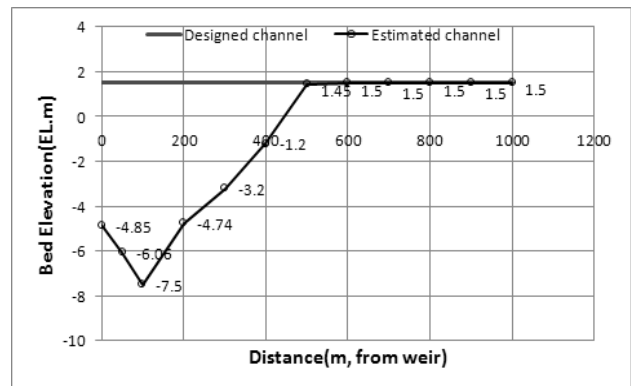
### 3.1 보와 바닥보호공 설치를 고려한 시나리오

보 설치 전(Case 1)과 설치 후(Case 2, 바닥보호공 미설치) 그리고 보 설치 후 바닥보호공 설치(Case 3)로 모의 조건을 구성하여 하상변동을 분석하였다. Case 3의 경우, 바닥보호공 설치 구간은 상류측 바닥보호공 18m, 물받이공 20m, 하류측 바닥보호공 40m로 설정하였으며 보체체를 포함하여 총 96m로 하였다. 일반적으로 보 체체 및 감세공은 철근콘크리트 구조물이고 바닥보호공은 굴요성 구조로 설계함을 원칙으로 하기 때문에 콘크리트 블록, 사석, 돌망태 등을 종방향으로 설치한다. 그러나 합천창녕보의 경우 일부 바닥보호공의 유실로 인하여 SPF공법<sup>1)</sup>으로 보강공사를 시행하였다. CCHE2D 모형은 하상바닥의 재료에 따라 침식정도를 지정할 수 있다. 따라서 보 및 보와 일체형인 물받이공은 콘크리트 구조로 침식이 발생하지 않으므로 'Non-erodible'로 지정하였고, 바닥보호공은 SPF로 재료 자체에 침식은 발생하지 않으나 유실 등의 안전을 고려하여 'Erodible Rock', 그 이외의 하천 구간은 침식과 퇴적이 발생하므로 'Erodible'로 정하였다(Fig. 9).

현재 보 운영시 홍수가 예측된 경우 수문을 개방하거나 사전에 예측하지 못한 경우에는 수문을 닫고 고정보로 월류함으로써 홍수량을 배제시킬 수 있도록 되어 있다. 그 이유는 홍수파가 발생하기 시작한 시점에 수문을 조작하기 시작하면 홍수파로 인하여 오히려 수문의 오작동이 발생할 수 있고 더 큰 에너지를 가진 홍수파의



(a) Transverse Profile



(b) Longitudinal Profile

Fig. 8. Scour Depth

1) 토목섬유 자루를 하천 바닥에 깔아놓고 그 안에 모르타르를 충전하는 방식

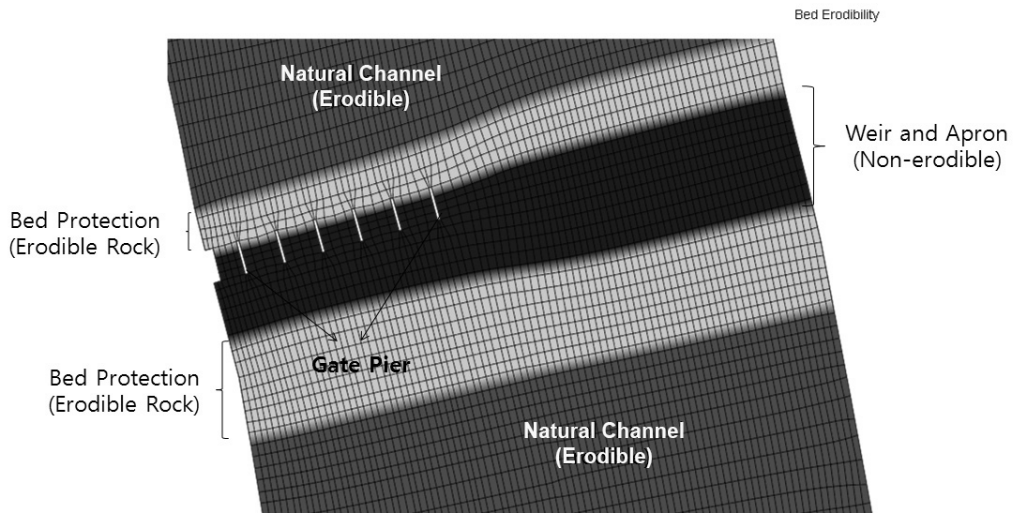


Fig. 9. Weir and Bed Protection Works in Hapcheon-Changryeong Weir

Table 3. Boundary Conditions of each Flood Frequencies

	50yr	100yr	200yr
Upstream Boundary (m <sup>3</sup> /sec)	12,800	14,300	15,700
Tributary Inflow (m <sup>3</sup> /sec)	2,880	3,260	3,610
Downstream Boundary (EL.m)	16.57	17.18	17.84
Total Sediment (tons/sec)	8.017	9.949	11.934
Simulation Time (sec)	86,400		



Fig. 10. Bed Change of 50yr Discharge within Whole Area



경우 수문이 파괴될 수 있기 때문이다. 따라서 실제 홍수발생시 보의 운영은 수문이 완전개방 되어있거나 닫혀있는 상태이다. 일반적으로 흐름 및 하상변동은 보의 수문이 완전히 개방되어 있는 상태에서 가장 크게 일어나므로, 본 연구에서도 가동보의 수문이 완전히 개방된 상태를 반영할 수 있도록 2차원 격자를 구성하고 모의를 수행하였다. 또한, 고정보의 경우는 보의 길이와 폭, 높이 등을 지형으로 고려한 격자를 구성하여 보의 수위가 고정보의 높이를 초과하는 경우 자유유펴 할 수 있도록 하였으며, 침식의 유무는 Fig. 9에서 보여주듯이 침식이 발생하지 않는 Non-erodible 조건으로 모델링하였다.

### 3.2 흐름 및 하상거동 특성

보설치 전(Case 1)과 설치 후(Case 2) 그리고 하상보호공 설치(Case 3)에 따른 대상구간의 상·하류의 홍수위차, 유속분포, 소류력 분포, 하상변동 등 하천흐름의 양상을 분석하기 위하여, Ministry

of Land, Transport and Maritime Affairs(2009b)에서 제시한 50년, 100년 그리고 200년 빈도의 유량과 수위를 상하류단 경계조건으로 하고(Table 3), 모의 구간 내 보 지점 하류에 위치하는 황강을 지류조건으로 고려하였다.

Fig. 10-15는 전체 하도구간내 빈도별 홍수량에 따른 하상변동 및 보 구간을 확대하여 하상변동에 대한 결과를 제시한 것으로, Fig. 10과 11은 50년 빈도, Fig. 12와 13은 100년 빈도 그리고 Fig. 14와 15는 200년 빈도에 대한 결과를 보여준다. 그리고 Table 4는 보 설치 전과 후(Case 1과 Case 3)의 빈도별 홍수량에 대한 보의 직상과 직하 지점에서 계산된 수위, 유속 그리고 소류력을 보여준다. 여기서 보의 직상직하는 보로부터 상류로 20m, 하류로 20m 떨어진 지점을 의미하며, 이는 바닥보호공의 길이를 고려하여 결정하였다.

합천창녕보에 대한 50년 빈도 모의결과는 다음과 같다. 보 설치로 인하여 보 상류와 하류의 수위차가 0.92m 발생하였고 보 설치 후,

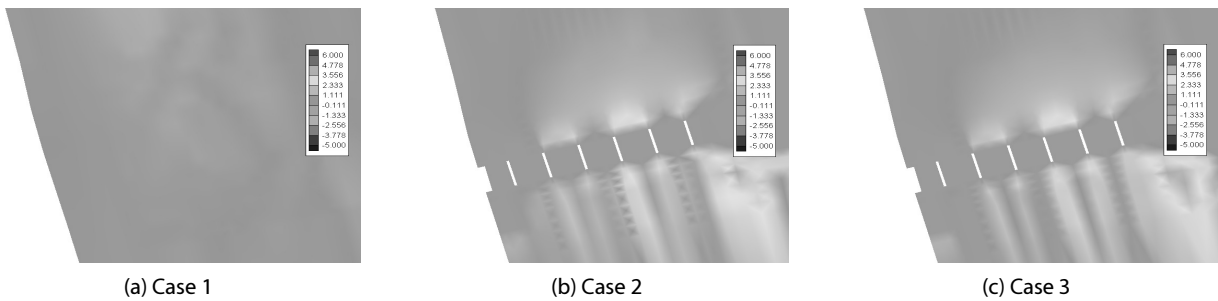


Fig. 11. Bed Change of 50yr Discharge within Weir Area

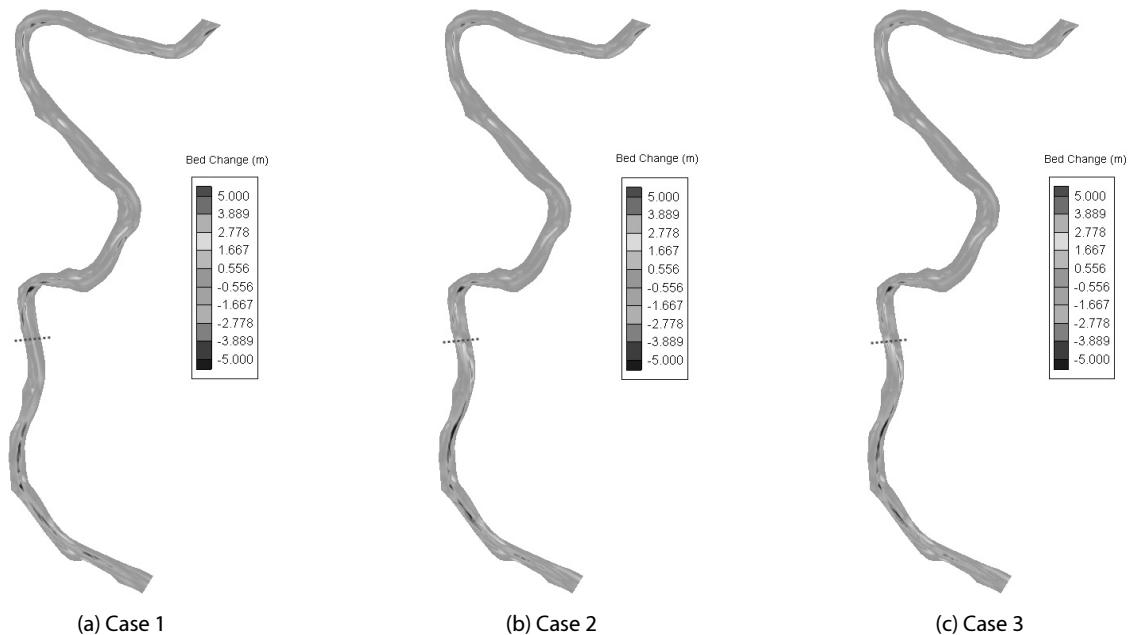


Fig. 12. Bed Change of 100yr Discharge within Whole Area

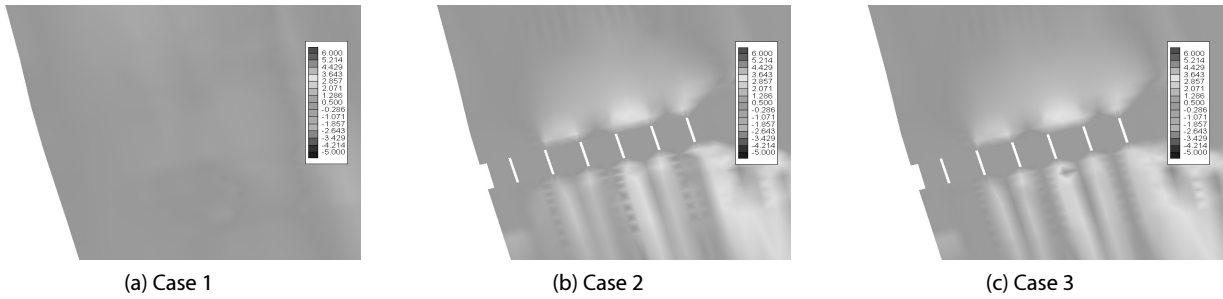


Fig. 13. Bed Change of 100yr Discharge within Weir Area

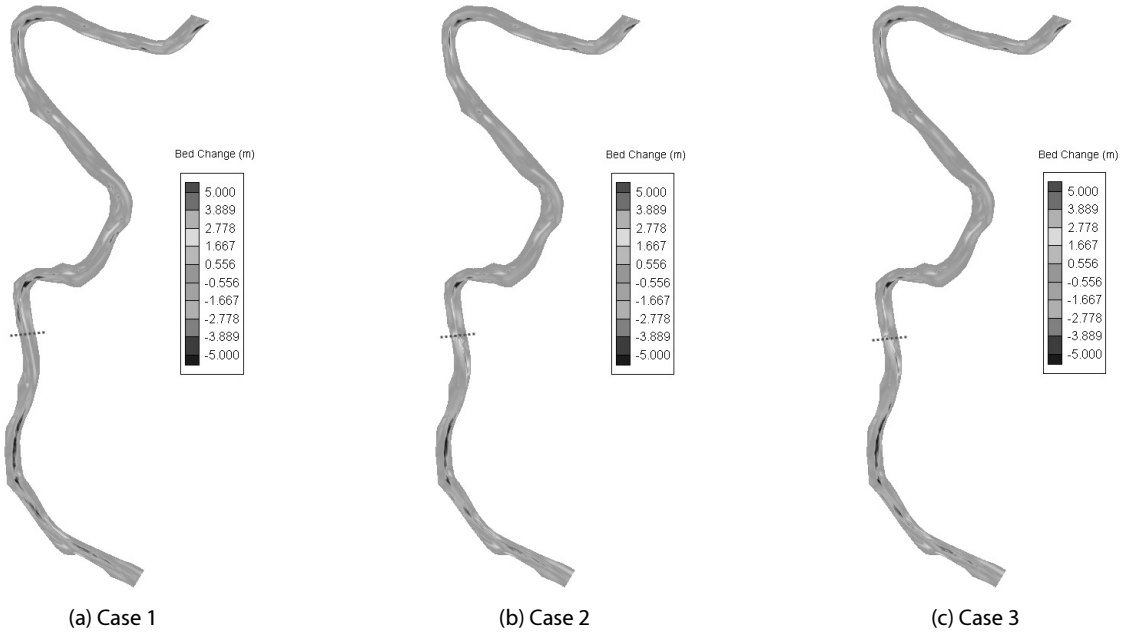


Fig. 14. Bed Change of 200yr Discharge within Whole Area

보 직상류부의 최대유속이 2.35m/sec, 보 직하류부에서 4.20m/sec로 크게 증가하였다(Table 4). 소류력은 보 직상류부에서 11.51N/m<sup>2</sup>, 보 직하류부에서 19.97N/m<sup>2</sup>로 크게 증가하였다(Table 4). Fig. 10은 전체하도구간에 대하여 보가 설치되기 이전 경우(Case 1), 보가 설치된 이후의 경우(Case 2), 보가 설치된 지점에 바닥보호공을 설치한 경우(Case 3)에 대한 결과를 제시하였으며 Fig. 11은 보 설치구간을 확대하여 좀 더 상세하게 하상변동 결과를 나타내었다.

Case 1의 경우, 만곡이 있는 구간에서 침식이 주로 형성되었고 직선구간에서 침식된 유사량이 퇴적되었으며 황강 합류이후 지점에서 침식이 우세를 이루고 있었다(Fig. 10(a)). 특히 합천창녕보 설치 지점 직상류 구간에서는 약 0.52m의 침식이 발생하였다(Fig. 11(a)).

Case 2의 경우, 보가 지점 상류 만곡구간에서 Case 1에 비하여 침식이 완화되지만 보 직상·직하지점에서는 상당한 퇴적(약 1.3m)

이 발생하는 것으로 보인다. 그러나 Fig. 11(b)에서 보 지점을 확대하여 살펴보면 보 직상류에서는 전반적으로 퇴적을 보이지만 보 직하류부에서는 퇴적과 침식이 교대로 형성되고 있는 것을 확인할 수 있다. 보는 고정정보와 가동보로 나뉘어지며 합천창녕보의 경우 수문 높이가 9m인 리프트 게이트형 가동보(연장 138m, 수문 기둥 포함)와 수문 높이 1m의 전도식 가동보(연장 80m), 정부 표고값이 EL. 10.5m인 연장 110m의 고정정보 구간으로 구성된다(Fig. 2(b)). 따라서 전체 보 연장 중 약 37%를 차지하는 좁은 리프트 게이트형 가동보 구간으로 유량이 집중되면서 유속이 빨라지고 소류력이 증가함에 따라 세굴이 발생한다. 그러나 대부분의 구간은 전도식 가동보 및 고정정보 구간으로 직상·직하류부의 유속 차이가 거의 발생하지 않았으며 구조물의 높이에 가로막혀 유사의 이동이 제한되어 대부분의 구간에서 퇴적이 발생된 것으로 판단된다. 또한 하천의 우안으로부터 설치된 가동보가 고정정보로 바뀌는

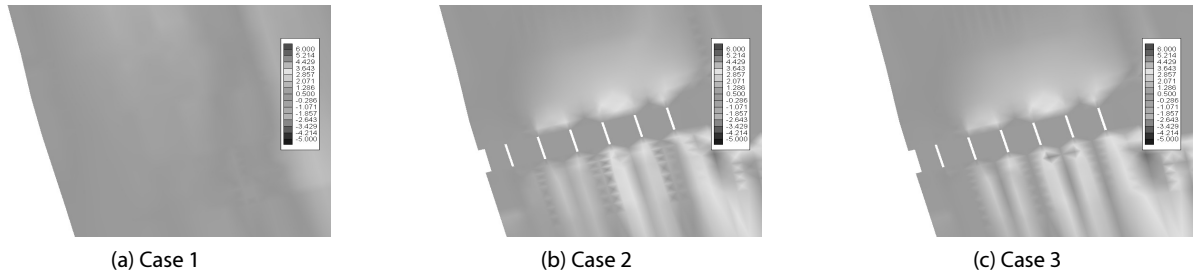


Fig. 15. Bed Change of 200yr Discharge within Weir Area

Table 4. Comparison of Stage and Velocity According to Frequency Discharge

Property	Stage (EL.m)						Velocity (m/s)						Tractive Force (N/m <sup>2</sup> )					
	50yr		100yr		200yr		50yr		100yr		200yr		50yr		100yr		200yr	
Case	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3	1	3
Upstream (20m)	17.70	18.58	18.40	19.30	19.07	19.97	2.99	2.35	3.15	2.45	3.28	2.53	14.68	11.51	15.38	12.36	15.95	13.04
Downstream (20m)	17.68	17.66	18.39	18.35	19.06	19.01	2.89	4.20	3.11	4.35	3.24	4.38	14.25	19.97	15.21	20.76	15.78	20.92
Difference	0.02	0.92	0.01	0.95	0.01	0.96	0.10	-1.85	0.04	-1.90	0.04	-1.85	0.43	-8.46	0.17	-8.40	0.17	-6.88

구간에서 하천 우안의 가동보 구간으로부터 빠져나온 유수량과 좁은 수문을 통과하면서 빨라지는 유속으로 발생한 세굴량이 유속이 느려지는 고정보 구간으로 이동하면서 이 구간에 퇴적이 발생한 것으로 보인다.

Case 3은 정성적으로 전 구간에 걸친 침식 및 퇴적이 발생하는 위치 및 정도가 Case 2와 거의 유사한 결과를 보여주었다(Fig. 10(c)). 그러나 Fig. 11(c)에서 보여주듯이, 바닥보호공의 설치로 인하여 보 직하류부에 세굴현상이 완화된 것을 확인할 수 있으며, 좀 더 자세한 사항은 비교 및 고찰에서 언급하였다.

100년 빈도 사상에 대한 보 설치 후의 보 직상·직하류부간의 수위차는 0.95m, 최대유속은 보 직상류에서 2.45m/s, 직하류부에서는 4.35m/s로 증가하였으며, 소류력은 직상·직하류에서 각각 12.36N/m<sup>2</sup>, 20.76N/m<sup>2</sup>로 산정되었다(Table 4). Fig. 12는 100년 빈도를 고려한 Case 1, Case 2, 그리고 Case 3에서의 전체 하도구간에 대한 하상변동 모의결과를 보여주며, Fig. 13은 보 설치구간을 확대하여 좀 더 상세하게 하상변동 결과를 나타내었다. Case 1의 경우 합천창녕보 설치 지점 주위에 약간의 침식구간(약 0.6m)이 형성되고 있는 것과는 다르게, Case 2와 Case 3의 경우 보의 설치로 인하여 보 하류부 고정보와 전도형 게이트형 구간에서 퇴적이 급증하였고, 가동보 구간에서는 50년 빈도의 경우와 마찬가지로 좁은 수문을 통과하는 유량의 집중으로 세굴이 발생하였다. 또한 50년 빈도와 마찬가지로 바닥보호공의 설치로 인하여 침식량이 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

마지막으로, 200년 빈도 사상에 대한 보 설치 후 보 직상·직하류

부간의 수위차는 0.96m로 100년 빈도와 0.01m차이가 발생하였고 최대유속은 보 설치 전 2.53m/s에서 보 설치 후 4.38m/s로 증가하였으며, 소류력은 직상·직하류에서 13.04N/m<sup>2</sup>에서 20.92N/m<sup>2</sup>로 상승하였다(Table 4). Fig. 14는 200년 빈도를 고려한 Case 1, Case 2, 그리고 Case 3에서의 전체 하도구간에 대한 하상변동 모의결과를 보여주며, Fig. 15는 보 설치구간을 확대하여 좀 더 상세하게 하상변동 결과를 나타내었다.

50년, 100년 그리고 200년 빈도에 대한 적용에서 수위 및 유속 그리고 소류력은 홍수량이 증가함에 따라 가동보 상·하류구간의 수위차가 커져 유속이 빨라지고 이에 따라 유수량 및 세굴량이 증가하는 패턴을 보였으나 차이가 크지 않음을 보여주었다. 또한, 보의 설치로 인하여 수문을 통과하는 흐름의 유속 및 소류력이 크게 증가하여 세굴이 발생하였으나, 이는 바닥보호공의 설치로 완화되는 것을 확인할 수 있었다.

### 3.3 수치모차

합천창녕보를 비롯하여 4대강에 건설된 보지점에는 하상변동을 모니터링 하기 위한 계측장비가 설치되어 있다. 그러나 현재까지 보수공사가 일부 진행 중이므로 신빙성 있는 자료를 획득하기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 이러한 현실적인 어려움을 감안하여, 본 연구에서 적용한 격자의 해상도(8m)보다 16배 높은 2m의 고해상도로 격자를 대상유역에 대해 구성하고, 이 고해상도 격자의 적용결과를 실측치로 가정하여 모형의 수치모차를 계산하였다. 하상변동에 대한 실측자료의 제한성뿐만 아니라, 지형자료의 제한

Table 5. Error Factor According to Stage, Velocity and Bed Change (unit:%)

	50yr	100yr	200yr
Stage	1.01	1.10	1.27
Velocity	1.40	1.45	1.92
Bed Change	2.99	3.06	3.14

성도 존재하여 본 계산과정의 한계성도 있지만, 실측자료의 확보에 어려움이 있는 상황에서는 모형의 적용성을 검증하기 위한 적합한 방법이라 판단하였다. 격자의 크기가 2m인 격자망을 실측값으로 가정하였을 때, 본 연구에서 적용한 8m 해상도의 격자를 적용하여 계산한 수위 및 유속과 하상변동에 대한 오차율을 Table 5에 나타내었다. 빈도별 홍수량이 증가함에 따라 수위 및 유속 그리고 하상변동에 대한 오차율이 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 모든 오차율이 3% 이내로 비교적 잘 일치하였다.

#### 4. 비교 및 고찰

바닥보호공의 설치에 따른 효과를 분석하기 위하여 빈도별 홍수량에 따른 하상변동량의 정량적인 비교 및 고찰을 수행하였다.

빈도별 홍수량에 대한 모의결과를 통하여 합천창녕보의 다기능 보 제체 및 바닥보호공 설치에 따른 하상변동 양상은 수위차에 많은 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 전체적인 하상변동 양상은 보 설치부에 가까울수록 퇴적과 침식작용이 매우 활발한 것으로 보여주었고, 50년, 100년 그리고 200년 빈도 순으로 하상변동 현상이 비교적 활발하게 나타났으며 수위차가 클수록 유속과 소류력이 증가하였다.

Case 1의 경우 보 설치 지점으로부터 하류방향으로 30m, 60m, 120m, 180m 지점에서의 침식은 50년 빈도의 경우 각각 0.18m, 0.09m, 0.06m로 이후 구간에 대해서는 침식이 발생하지 않았으며 100년 빈도의 경우 0.55m, 0.35m, 0.17m, 0.08m, 200년 빈도는 0.69m, 0.43m, 0.23m, 0.14m의 최대 침식이 발생하였다.

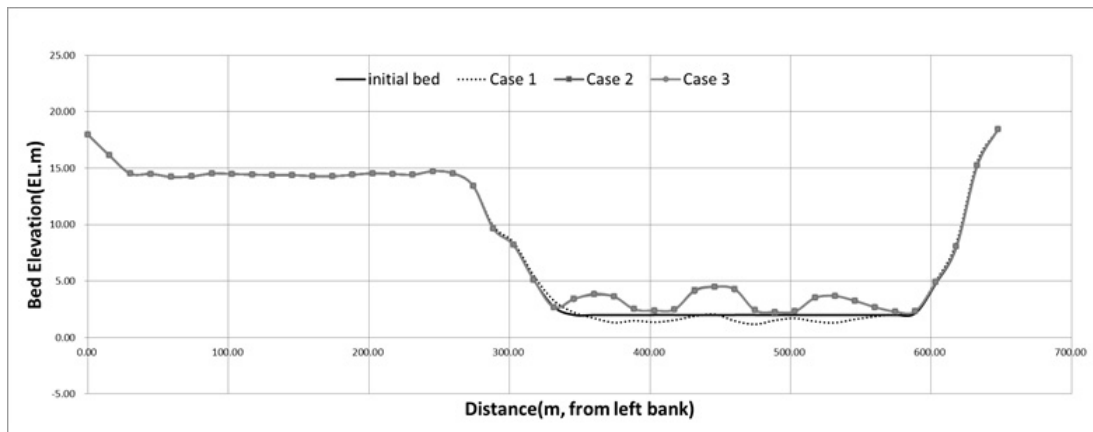


Fig. 16. Bed Elevation of Cross Section at Upstream of Weir

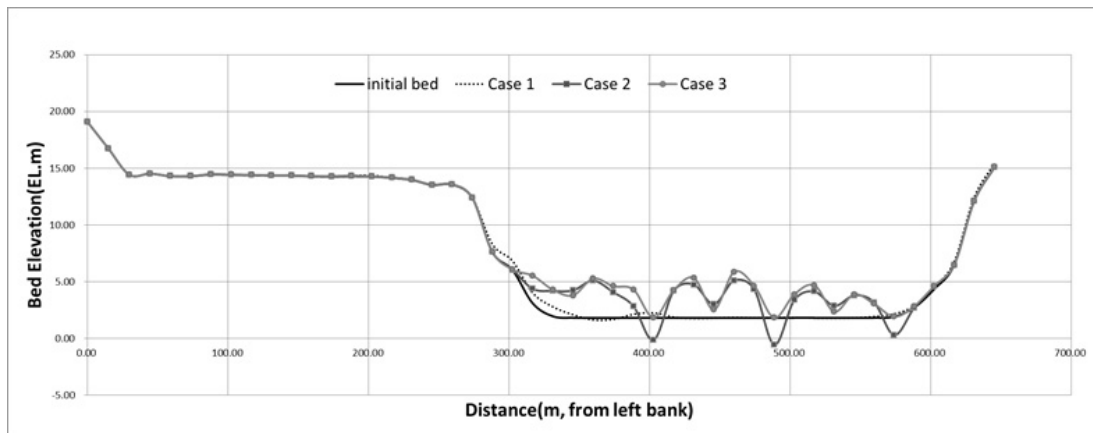


Fig. 17. Bed Elevation of Cross Section at Downstream of Weir

Case 2의 경우 보 설치지점으로부터 하류방향으로 30m, 60m, 120m, 180m 지점에서의 침식은 50년 빈도의 경우 각각 2.38m, 1.94m, 0.93m, 0.4m, 100년 빈도의 경우 2.50m, 2.10m, 1.02m, 0.53m, 200년 빈도는 2.51m, 2.12m, 1.14m, 0.57m의 최대침식이 발생하였다.

Case 3의 경우는 30m지점은 바닥보호공의 영향으로 침식이 발생하지 않았으며 60m 구간에서는 50년 빈도의 경우 0.52m, 100년 빈도 0.72m, 200년 빈도 0.65m로 규칙적이지는 않지만 바닥보호공이 설치되기 이전인 Case 2에 비하여 침하량이 감소한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 바닥보호공이 설치가 끝나는 지점으로부터 다시 침식이 발생하고 있으며 보가 설치되기 이전(Case 1)에 비하여 침식량이 증가하였기 때문에 침식이 상류로 이동하여 바닥보호공 및 보 체체에 영향을 미치지 않도록 세심한 주의가 필요할 것으로 판단된다.

Fig. 16~17은 보 직상·직하 구간에 대하여 Case 1, Case 2 그리고 Case 3에 대하여 하상변동을 나타낸 것으로 보의 설치로 인하여 직상구간에는 퇴적이 발생하였으나, 직하구간에는 퇴적과 침식이 교대로 발생한 것을 확인할 수 있었다. 보의 직상·직하 구간 모든 지점에서 퇴적과 침식이 동시에 발생하지만 퇴적량과 침식량의 차이에 따라 최종적으로 해당지점의 하상변동이 결정된다. 즉, 보 직상구간에서도 침식이 발생하지만 상대적으로 전도식 게이트와 고정보로 인하여 하류로 통과하지 못한 퇴적량과 상류로부터 이송되어온 유사량의 합이 침식량 보다 우세하여 결국 퇴적구간이 형성된 것으로 판단된다. 또한 보직하구간은 빠른 유속으로 인하여 침식이 우세하여 하상저하가 발생하는 구간과 상류로부터 리프트형 게이트를 통하여 이송된 유사량과 세굴량은 유속이 느려지는 고정보 및 전도게이트구간에서 퇴적되어 하상상승이 발생하는 구간이 나타난 것으로 보이며 퇴적량 또한 보가 설치되기 이전(Case 1)보다 상당히 증가한 것을 확인할 수 있었다.

보의 건설은 댐과 마찬가지로 하천을 횡단하는 구조물이기 때문에 상류는 유입되는 유사가 하류로 이송되지 못하여 퇴적이 발생하고 그로 인하여 하류는 유사의 공급이 차단되어 침식이 발생하지만 그러나 보는 가동보를 운영하기 때문에 수문의 개폐에 따라 유사의 이송여부가 결정된다. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs(2010)에서 수립한 합천창녕보에 대한 수리모형실험보고서에서는 수리실험 조건을 가동보 완전개방, 유입유량은 평수량(162m<sup>3</sup>/s), 하류 경계조건은 관리수위(EL. 0.76m)로 하여 보 구조물 주변 퇴적토사의 하류하천 배사능력을 검토하였다. 실험결과, 게이트 직상류부의 퇴적토사는 대부분 방류되었다고 기술되어 있다(Ahn and Ryu, 2013). 그러나 본 연구의 결과는 퇴적토사가 하류하천으로 대부분 방류되지 않고 고정보 및 전도게이트 구간에 남아있어 상이한 결과를 보이고 있었다. 보고서에 제시된 실험조건

은 합천창녕보를 대상으로 평수량 유입시 배사능력을 검토한 것으로 본 연구의 대상 다기능보인 합천창녕보와는 구조 및 형식 그리고 규모가 상이하고 모의 조건이 빈도별 홍수량을 적용한 것 등이 다르기 때문에 상대적 비교가 어렵기 때문에 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 연구에서는 합천창녕보 구간의 흐름 및 하상변동 예측에 대한 CCHE2D 모형의 적용성을 검증하기 위해 적포교 수위관측소의 실측수위와 모의결과를 비교하여 자연하천에서의 적용성을 검증하고 보설치 후 하천의 흐름과 하상변동 양상을 비교 분석하였다. 그리고 바닥보호공의 설치로 인한 세굴현상의 변화를 검토하였으며, 본 연구의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) CCHE2D 모형의 매개변수 중 일반적으로 흐름과 하상변동에 가장 큰 영향을 미치는 것은 조도계수로서 이에 대한 검·보정을 합천창녕보 구간에 대하여 수행하였으며 절대값평균오차, 평균 제곱근오차를 산정하여 가장 최저 오차를 보인 0.025를 채택하였다.
- (2) 보 설치로 인한 하천 흐름특성과 하상변동에 대하여 2차원 수치해석을 수행하기 위해서 합천창녕보 구간에 대하여 보설치 전·후와 하상보호공 설치 후의 2차원 유한 요소망을 구성하고 50년 빈도, 100년 빈도, 200년 빈도 홍수사상에 대하여 모의를 실시하고 수위, 유속, 소류력, 하상변동량 등 도출된 결과로부터 보 및 바닥보호공의 설치로 인한 영향을 분석하였다.
- (3) 합천창녕보 설치지점 상류구간에 대해 보가 건설되기 이전(Case 1)의 경우 횡단면에 대하여 평균 약 0.52m의 침식(50년 빈도)이 발생하였으며, 보가 건설된 이후(Case 2)에는 전도게이트형 가동보와 고정보에서 퇴적이 주로 발생하였고 리프트게이트형 가동보에서는 거의 퇴적이 발생하지 않았다. 바닥보호공의 설치(Case 3)로 인한 하상변동은 Case 2와 거의 일치하는 결과를 보였으며 빈도별 홍수량에 따라 하상변동량은 증가하는 경향을 보였다.
- (4) 합천창녕보 설치지점 하류구간에 대해 보가 건설되기 이전(Case 1)의 경우 하류방향으로 30m, 60m, 120m지점에서의 침식은 각각 0.18m, 0.09m, 0.06m로 이후 구간에 대해서는 침식이 발생하지 않았으며(50년빈도), 보가 건설된 이후(Case 2)에는 2.38m, 1.94m, 0.93m의 침식이 발생하였다. 바닥보호공의 설치(Case 3)로 인한 하상변동은 30m지점은 바닥보호공의 영향으로 침식이 발생하지 않았으며, 60m 구간에서 0.52m의 침식이 발생하였다. 그러나 전도게이트형 가동보와 고정보

구간에는 보 상류구간과 마찬가지로 퇴적이 형성되었으며 빈도 별 홍수량에 따라 하상변동량은 증가하는 경향을 보였다.

- (5) 보 수문을 통과하는 빠른 유속으로 발생하는 침식현상은 바닥 보호공을 설치함으로써 완화됨을 보여주어, 보와 같은 하천구조물의 세굴현상을 방지할 수 있을 것으로 보인다. 향후 보다 정밀한 보 설치부의 자료와 면밀한 실측 조사를 통해 얻은 유입 유사량 자료를 추가하여 유사모의를 실시한다면 하상 변동예측 및 하도변화 연구에 보다 활용도 높은 결과를 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

### 감사의 글

이 논문은 2012학년도 경북대학교 전임교원 연구년 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

### References

- Ahn, J. M. and Lyu, S. W. (2013). "Analysis of flow and bed change on hydraulic structure using CCHE2D: Focusing on Changnyong-Haman." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 7, pp. 707-717 (in Korean).
- Jang, E. K., Ji, U., Kwon, Y. S. and Yeo, W. K. (2013). "Investigation for bed stabilization methods in the upstream channel of haman weir using CCHE2D model." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 33, No. 6, pp. 2211-2221 (in Korean).
- Ji, U., Yeo, W. K. and An, S. W. (2010). "Numerical analysis for bed changes due to sediment transport capacity formulas and sediment transport modes at the upstream approached channel of the nakdong river estuary barrage." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 43, No. 6, pp. 543-557 (in Korean).
- Jung, J. K. (2011). "An experimental study for estimation of bed protection length." *Journal of Wetlands Research*, Vol. 13, No. 3, pp. 677-686 (in Korean).
- Korea Water Resources Association (2009). *River design standard-commentary* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009a). *The detail design of development of residential sites for nakdong river 20 district* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2009b). *The basin plan of stream improvement for nakdong river; Geumho river-Estuary* (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2011). *4 Rivers reduce the flood risk*, Available at: <http://riverguide.go.kr> (Accessed: December 8, 2014).
- Nakdong river first region special investigation group (2012). *The report on special investigation for the Nakdong river completion* (in Korean).
- Park, Y. J., Cho, J. K. and Im, J. H. (2007). "A study on simulation of long-term sediment transfer in medium and small scale dam upstream using SED-2D models." *Journal of Korea Society of Environmental Administration*, Vol. 13, No. 4, pp. 241-248 (in Korean).
- Shin, Y. H. and Pierre, Y. J. (2009). "Channel changes and effect of flow pulses on hydraulic geometry downstream of the Hapcheon dam." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 42, No. 7, pp. 579-589 (in Korean).
- Son, H. G., Lee, J. S., Shin, S. C. and Moon, C. G. (2014). "A study of sediment discharge and bed change characteristics of the local rivers in Korea." *Journal of the Korean Geoenvironmental Society*, Vol. 15, No. 6, pp. 31-39 (in Korean).
- Wu, W. M. (2001). *CCHE2D Sediment transport model*, technical report No. NCCHE-TR-2001-3, National center for computational hydroscience and engineering, Oxford, Mississippi.
- Yang, C. T. (2003) *Sediment transport: Theory and Practice*, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida.