

## CCHE2D 모형을 이용한 함안보 상류 하상안정화 방안 검토

장은경\* · 지 운\*\* · 권용성\*\*\* · 여운광\*\*\*\*

Jang, Eun Kyung\* · Ji, Un\*\* · Kwon, Yong Sung\*\*\* · Yeo, Woon Kwang\*\*\*\*

### Investigation for Bed Stabilization Methods in the Upstream Channel of Haman Weir Using CCHE2D Model

#### ABSTRACT

During the four river restoration project, several weirs were constructed in the four rivers to prevent drought and flood, to improve water quality, and to manage water resources. However, due to the weir construction, bed changes are produced in the upstream channel of installed weirs because the incoming flow velocity is reduced and sediment transport capacity is also lowered. Especially, since the Haman Weir is located in the lowest downstream section among newly installed weirs in Nakdong River, bed change and sedimentation problems are expected due to the mild slope and reduced velocity. Therefore, numerical simulation was performed to analyze flow and bed changes in the upstream channel of Haman Weir and to evaluate quantitatively sediment control methods for bed stabilization using CCHE2D model. As a result of flow and bed change simulation after installation of Haman Weir, the flow velocity at the initial condition was faster than the final bed condition with the specific simulation time and it was represented that the locations where bed changes were great were identical for all modeling conditions of flow discharge. In case of 4.5 m of water level lowered from 5.0 m of the management water level at Haman Weir for bed stabilization, the flow velocity was generally faster than the case of the management water level and the continuous erosion was developed at the most narrow channel section as the applied discharge and simulation period were increased. The channel width extension at the most narrow channel section was proposed in this study to prevent and stabilize continuous bed erosion. As a result of numerical analysis, there was no bed erosion after channel width extension and it was presented that the channel geometry extension was effective for bed stabilization at Haman Weir.

**Key words** : Bed stabilization, Bed change, Channel width extension, Haman Weir, CCHE2D model

#### 초 록

4대강 살리기 사업을 통해 가뭄 및 홍수문제를 예방하고 수질개선 및 종합적인 물 관리를 위해 4대강에 다수의 보가 설치되었다. 그러나 보의 설치로 인해 상류로부터 유입되는 유속이 감소되어 유입된 유사의 이송능력 또한 저하됨으로써 보 상류구간에서의 하상변화가 발생한다. 특히 함안보는 낙동강에 설치된 8개의 보 중 낙동강 최하류단에 설치되어 완만한 경사와 유속 감소로 인해 하상변동 및 지속적인 퇴사문제와 더불어 하상의 불안정화가 더욱 클 것으로 예상된다. 이에 본 연구에서는 2차원 모형인 CCHE2D를 이용하여 함안보 설치에 따른 보 상류에서의 흐름 및 하상변동 분석을 실시하고 이를 통해 하상의 안정화를 위한 방안들의 정량적인 평가를 실시하였다. 함안보 설치 후 흐름 및 하상변동 모의 결과, 모든 모의유량 조건에서 초기하상에서의 유속이 일정 지속기간이 지난 후 하상에서의 유속보다 빠르게 나타났으며, 전체 모의구간에서 하상변동이 크게 발생한 지점의 위치가 모든 적용유량에 대해 동일하게 나타났다. 이에 따라 하상안정화를 위해 하류단 수위를 함안보 관리수위 5.0

\* 정회원 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 석사후연구원 (jang@kict.re.kr)

\*\* 정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원

(Corresponding Author · Korea Institute of Construction Technology · [jiuncivil@gmail.com](mailto:jiuncivil@gmail.com))

\*\*\* 정회원 · 평화엔지니어링 수자원부 사원 (kys4341@naver.com)

\*\*\*\* 정회원 · 국립재난안전연구원 원장 (yeo@mju.ac.kr)

Received March 6, 2012/ revised April 19, 2012/ accepted June 20, 2013

m에서 4.5 m로 저하시킬 경우, 유속분포는 관리수위일 때보다 전반적으로 빠르게 나타났으며 하폭이 가장 좁은 지점에서의 침식현상은 하류단 수위저하에 관계없이 지속적으로 나타났다. 이에 본 연구에서는 하폭이 가장 좁은 지형의 하폭을 확대시키는 방법을 제안하였으며 수치모의 분석 결과, 하폭 확대 후 지형에서 지속적인 침식이 예상되는 구간에서의 하상변동은 거의 발생하지 않아 하상의 안정화 효과가 있는 것으로 나타났다.

**검색어** : 하상안정화, 하상변동, 하폭확대, 합안보, CCHE2D 모형

## 1. 서론

하천에 보를 설치할 경우, 각종 용수의 취수가 용이하고 주운 등을 위한 수위조절이 가능하며 조수의 역류를 방지하는 등의 이점이 있다(정종호와 윤용남, 2009). 그러나 보의 설치에 하천 상류로부터 유입되는 자연적인 흐름을 방해하며 유속을 감소시킨다. 유속의 감소는 유사이송능력 저하의 원인이 되며 상류로부터 유입된 유사는 보 상류구간에 퇴적되게 됨으로써 하상의 불안정화를 초래한다. 이렇게 발생한 퇴사는 보의 기능적인 측면에 악영향을 미칠 우려가 있으며 홍수위 상승, 저수용량 저하, 탁수에 의한 환경오염 등에 대한 다양한 문제들의 원인이 될수 있다(유권규와 우효섭, 1990). 국내 하천의 경우 4대강 살리기 사업으로 인해 4대강에 다수의 보가 설치되었으며, 특히 낙동강 살리기 사업 추진 시 건설된 8개 보의 유사 퇴적문제는 유지관리 측면에서 반드시 검토되어야 할 것으로 예상된다. 그 중 18공구(창년2 합안 1지구) 지역에 건설된 합안보의 경우 8개의 보 중 낙동강 최하류단에서 위치하고 있으며 완만한 경사와 유속 감소로 인해 지속적인 퇴사문제가 발생할 것으로 예측된다. 따라서 하상변동의 정량적 예측과 문제점 분석 및 이에 따른 보 상류 하상의 안정화 방안 등에 대한 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다.

일반적으로 댐이나 보 상류에서의 퇴사를 저감시켜 하상을 안정화시키는 방안에는 퇴적된 토사를 준설장비로 준설하는 방법, 홍수 시 유입되는 유사를 방류수로 배사하는 즉시배사방법, 수위 저하로 자연흐름을 유도한 후 퇴적토사를 배사시키는 유사플러싱 방법 등이 있다(Ji et al., 2011). 이러한 퇴사저감 효과에 대한 연구로는 Teal and Remus(2001)이 미국 Sharpe 호를 대상으로 HEC-6T 모형을 이용한 퇴사저감 방안 분석 연구를 수행하였으며, 저수지 수위를 낮추는 플러싱 방법이 다른 퇴사저감 방안에 비해 효과적인 것으로 제시하였다. 특히 국내의 경우 김권한(2011)과 지운 등(2011a)이 낙동강하구둑에서의 준설, 플러싱 방법 그리고 하도의 하폭축소를 통한 퇴사저감 방안 등에 대해 CCHE2D 모형을 이용하여 정량적인 평가를 실시한 바 있으며 플러싱 방법과 하폭축소 방법이 준설방법을 대체할 수 있는 효과적인 방법이라고 평가하였다. 지운 등(2011b)은 낙동강 하구둑 상류에서 하폭이 급확대되는 구간에 유사가 퇴적되는 현상을 완화시키기 위해 하폭을 축소하는 방법을 제안하였으며 이에 대해 2차원 수치모형을 이용하여 하폭의

변화에 따른 하상변화를 정량적 분석으로 분석하였다. 하폭의 축소 및 확대에 따른 흐름 및 하상변동에 대한 연구로는 김주석(2007)이 하천폭의 국부적 축소 및 확대에 따른 유수흐름의 변동을 1차원 수치해석 통해 실시하고 수리모형실험을 통해 비교하였다.

본 연구에서는 낙동강 합안보를 대상으로 인위적인 보 건설 후의 하상변화를 분석 및 문제점을 도출하고, 이에 대한 하상안정화 방안 검토를 위해 수위저하와 하폭확대 방법에 대한 2차원 수치모형을 이용하여 정량적인 평가를 실시하였다. 본 연구의 목적은 첫째, CCHE2D 모형을 이용하여 합안보 설치에 따른 흐름 및 하상변동을 모의하고 보 설치에 따른 보 상류구간의 수리적, 지형학적 변화를 정량적으로 분석하는 것이다. 둘째, 하류단 수위저하를 통한 하상안정화 방안과 하폭이 가장 좁은 국부적인 구간에 대해 하폭을 확대하는 하상안정화 방안을 각각 수치모의를 통해 정량적으로 분석하는 것이며 최종적으로는 합안보 상류의 하상의 안정화를 위한 방안들을 평가하고 실제 적용가능성에 대해 분석하기 위한 것이다. 특히 일반적인 2차원 하상변동 모의의 경우 평면적 지형경계가 고정되어 모의가 수행되는 기술적 한계로 인해 하안침식을 동반한 하상변동의 자연현상을 예측하는데 문제점이 발생한다. 본 연구에서는 이러한 수치모의의 기술적 한계를 고려하여 하폭의 변화가 하상변동에 미치는 영향을 합안보상류 구간에 대해 정량적으로 평가하였으며, 이러한 연구결과는 하폭변화 방법에 대한 하상안정화 방법으로써의 적용 가능성을 평가하기 위한 기초자료로 활용 될 수 있을 것이다.

## 2. 대상지역

낙동강 유역은 한반도 남동부에 위치하여 북쪽으로는 한강 유역, 서쪽으로는 금강 및 섬진강 유역과 접하고 있는 우리나라에서 두 번째로 큰 유역이다. 유역면적은 남한면적의 약 25%인 23,384.2 km<sup>2</sup>이고 유로연장은 510.4 km이다. 낙동강 유역의 유역평균 폭은 46.3 km이고, 지류 중에서는 남강이 가장 크며 유역평균 폭은 18.68 km, 연 강수량은 관측소 별로 1,244 mm 정도의 분포를 보인다(국토교통부, 2009). 본 연구의 수행구간(Fig. 1)은 낙동강 살리기 18공구 사업 범위 중 합안보에서 상류 4.2 km 구간이다. 경상남도 창원군 길곡면에서 합안군 칠북면 사이에 위치한 합안보는 보연장 567.5 m(가동보 146 m, 고정보 421.5 m)로 설치되었으

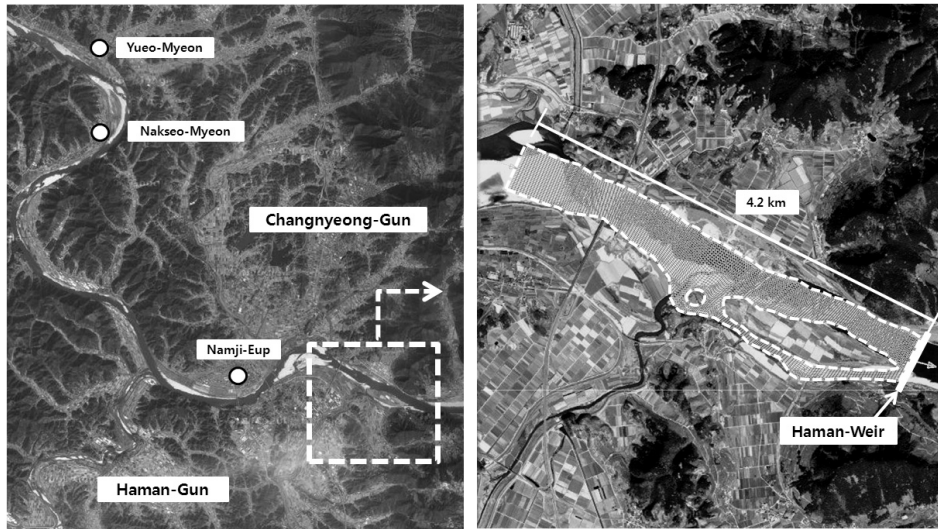


Fig. 1. Study Reach of the Lower Nakdong River

며, 2011년 10월 29일 부로 공사가 완료되어 일반인에게 공개되었다. 앞으로 함안보의 설치로 인해 유량, 수위, 유사량 등 하천특성이 변화 될 것으로 판단되며 함안보 설치 후 예상되는 지형자료와 과거 및 현재의 수리, 수문, 유사량 자료 등을 수집하여 2차원 하상변동 모형 CCHE2D를 이용하여 모의를 수행하였다.

### 3. 수치모의의 개요

#### 3.1 적용 모델 및 모형 검보정

본 연구에서 선정한 2차원 수치모형인 CCHE2D 모형은 하천의 흐름 특성과 하상변동을 파악하기 위해 Mississippi 대학의 NCCHE (National Center for Computational Hydroscience and Engineering) 에서 개발한 모형이다. CCHE2D 모형은 모의구간에 대한 지형을 구축하는 CCHE2D MESH Generator 프로그램과 구축한 지형과 계산에 필요한 입력조건을 이용하여 계산 및 결과를 보여주는 CCHE\_GUI 프로그램으로 구성되어 있다. CCHE2D 모형의 큰 특징으로는 하상도 입도분포를 입력하여 모의가 가능하며 총유사, 소류사 그리고 부유사 각각의 이송형태에 대해서 모의가 가능하다는 점이다. 또한 총유사 모의시 Wu et al.(2000)의 유사량 공식이 적용 가능하며 소류사나 부유사 모의시에는 Ackers and White (1973), Engelund and Hansen(1967), Wu et al.(2000), SEDTRA Module(Garbrecht et al. 1995) 등 여러 가지 유사량 공식을 다르게 적용하여 모의할 수 있다.

CCHE2D 모형은 흐름에 대한 지배방정식으로 3차원 레이놀즈 방정식을 대부분의 개수로 흐름이 천이류 흐름임을 적용하고 연직으로 수집적분한 2차원 운동량방정식을 사용한다. 유사모의는 수심

적분된 2차원 이송-확산방정식을 사용하며 하상변동은 유사연속방정식을 적용한다(한국수자원학회, 2005).

본 연구의 선정 모형인 CCHE2D의 경우 하상변동 모의를 위한 유사량 산정공식 및 유사이송 형태를 사용자가 선택하도록 되어있다. 하상변동 모의의 경우 유사이송공식을 어떤 것을 적용할 것인가와 유사이송형태를 어떤 것으로 결정할 것인가에 따라 하상변동 값이 가장 민감하게 나타나며 이 두 가지 사항이 하상변동 모형의 주된 보정 변수이다. 대상구간에서 검보정을 수행하기 위해 확보할 수 있는 유효한 과거자료는 진동지점의 유사량 관측 자료와낙동강 하구둑 상류의 준설 전 후에 수행된 하상변화 지형측량 값이다. 따라서 동일구간 내 자료는 아니지만 자료가 유효하지 않을 경우 가장 근접한 구간에서의 현장자료를 활용하는 것이 원칙이므로 본 연구에서는 유사이송 공식 선택을 위해 낙동강하구둑에서의 유사량 공식 및 유량 크기별 민감도 분석에 대해 한승원(2010) 및 지운 등(2010)이 수행한 낙동강하류 하상변동 모형 검보정에 대한 선행연구 결과를 참고하였다. 연구에 따르면 2차원 수치모의(CCHE2D 모형 이용)시 낙동강 하류에서 실제 발생하는 하상변화와 가장 근접한 하상변동 결과값을 도출해 낸 공식은 Ackers-White (1973) 공식이라고 제시하였으며 이에 따라 본 연구에서도 Ackers-White(1973) 공식을 하상변동모의를 위한 유사량 공식으로 채택하였다. 또한 유사 이송형태 선정을 위해서 소류사와 부유사 이송형태를 모두 적용하여 함안보 상류 모의구간에 대해 사전모의를 수행한 결과, 소류사 이송형태를 적용했을 때는 국부적인 세굴현상만 모의되었으며 부유사 이송형태의 경우는 모의구간에 전체적으로 하상변동이 발생하였다. 따라서 본 연구에서는 부유사 이송형태를 선정하여 모의를 수행하였다.

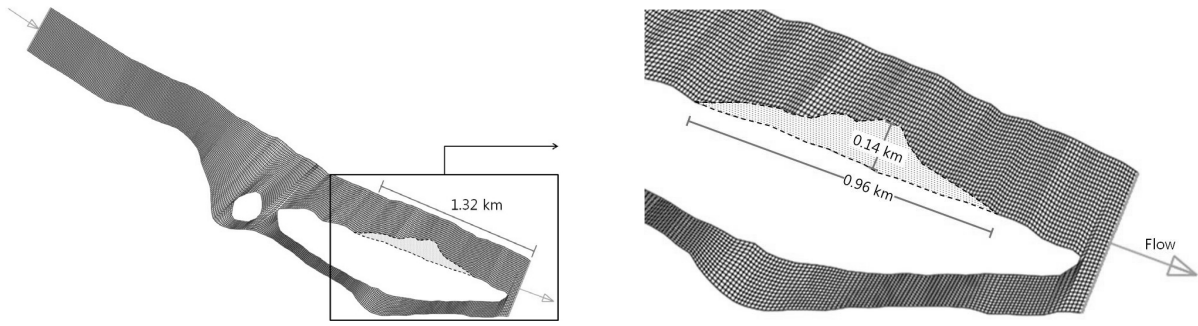


Fig. 2. Channel Geometry with River Width Extension

### 3.2 입력자료

본 연구에서는 수치모의를 위한 지형자료로 한국수자원공사에서 2010년에 실시한 낙동강 살리기 18공구(창녕2 함안1 지구) 사업 실시설계(한국수자원공사, 2010) 자료를 활용하였다. 지형자료는 지도상의 등고선을 고려하여 요소망의 각 절점에서 선형 보간하였고 보 설치 후 지형은 준설 설계단면을 활용하였으며, 이를 통해 보 설치 및 준설 후 단면을 고려하여 하상안정화 방안 검토를 위한 수치모의를 수행하였다. 지형자료는 CCHE2D 상에서 사용할 수 있는 보간 기법 중 모형의 매뉴얼 상에서 추천하는 Structured 기법을 사용하여 보간하였다. 모형의 mesh 격자는 수치모의 조건에 따라 30 m 간격과 10 m 간격으로 나누어 구축하였다. 함안보 설치에 따른 상류에서의 하상변동과 하류단 수위저하에 따른 하상변동을 모의할 때는 mesh 간격이 30 m인 지형을 사용하였고 하폭 확대에 따른 하상변동을 모의시에는 하폭 확대에 의한 지형변화가 요소망의 절점 보간의 변화에 미치는 영향을 최소화하기 위해 mesh 간격이 10 m인 지형을 사용하였다. 하폭을 확대한 구간은 하폭축소가 시작되는 함안보 상류 1.32 km 지점으로부터 흐름방향으로 0.96 km 떨어진 지점까지이다. 하폭 확대구간은 Fig. 2와 같으며 최대 확대된 하폭은 140 m이다. 함안보 지점에서의 Manning 조도계수는 낙동강수계 하천기본계획(변경)(국토교통부, 2009)에서 분석된 0.023을 적용하였다.

하상도 자료는 낙동강 살리기 18공구(창녕2 함안1 지구) 사업 실시설계 보고서에서 제시한 값을 사용하였다. 모의구간의 대표입경은 0.1 mm와 0.2 mm를 사용하였으며 비중은 2.675를 사용하였다. 모래층의 두께는 2.0 m, 이송가능한 모래 입경은 0.25 mm로 선정하였다. 유입 유사량 계산을 위한 유량-유사량 관계식은 유사량 자료가 있는 왜관과 진동지점 중 함안보에서 약 7 km 떨어진 진동지점의 관측식을 활용하였으며, 2009년도 유량조사 보고서(국토교통부, 2010)에서 제시된 관계식을 사용하였다.

난류 모형 조건으로는 Parabolic Eddy Viscosity Model을 사용하였고 수치해석 기법 중 Wall Slipness Coefficient는 0.5, 그리고 마름상태의 지형이 많은 경우 오류가 발생함을 감안하여 마름상태

지형의 허용 기준수위는 0.04 m를 사용하였다. 모의시간 간격은 모의 조건별로 60 sec 간격(1,440 회/day)을 적용하였다.

### 3.3 모의 조건

본 연구에서는 첫째, 함안보 설치에 따른 보 상류의 흐름 및 하상변동을 모의하고 둘째, 하류단 수위저하를 통한 하상변동 모의를 통해 하상안정화 효과를 분석하며 마지막으로 하폭이 축소되는 구간의 지형변화를 통한 하상안정화 효과를 정량적으로 모의하였다. 함안보 설치에 따른 보 상류의 흐름 및 하상변동을 모의하기 위한 조건에서 하류단 수위는 함안보에서의 관리수위 5.0 m를

Table 1. Simulation Conditions of Discharge, Water Level, and Simulation Time

| Discharge (Q, m <sup>3</sup> /s) | Downstream Water Level (H <sub>d</sub> , m) | Simulation Time (Days) |
|----------------------------------|---|------------------------|
| 500                              | 5   | 10                     |
|                                  |   | 30                     |
|                                  |   | 90                     |
|                                  | 4.5   | 10                     |
|                                  |   | 30                     |
|                                  |   | 90                     |
| 1,000                            | 5   | 10                     |
|                                  |   | 20                     |
|                                  |   | 30                     |
|                                  | 4.5   | 10                     |
|                                  |   | 20                     |
|                                  |   | 30                     |
| 2,000                            | 5   | 1                      |
|                                  |   | 3                      |
|                                  |   | 10                     |
|                                  | 4.5   | 1                      |
|                                  |   | 3                      |
|                                  |   | 10                     |

적용하였다(한국수자원공사, 2010). 함안보에서 유량 3,200 m<sup>3</sup>/s를 초과하게 되면 전체 수위가 하류단 관리수위 5.0 m를 월류하게 되며 유량이 350 m<sup>3</sup>/s 미만일 경우 모의구간에서 하상변동이 거의 발생하지 않게 된다. 이에 유량 350 m<sup>3</sup>/s와 3,200 m<sup>3</sup>/s의 범위에서 연평균 30일의 발생일 수를 갖는 유량 1,000 m<sup>3</sup>/s를 모의 조건으로 선정하였으며 유량별 민감도 분석을 수행하기 위해 연평균 90일의 발생일 수를 갖는 500 m<sup>3</sup>/s와 연평균 10일의 발생일 수를 갖는 2,000 m<sup>3</sup>/s 유량을 추가 적용하였다. 유량별 지속기간은 각 유량의 연평균 발생일 수 이하의 값들을 선정하였다.

하류단 수위저하를 통한 흐름 및 하상변동 모의시 유량과 지속기간의 경우 함안보 설치에 따른 흐름 및 하상변동 모의조건과 동일하게 적용하였으며 하류단 수위는 관리수위에서 0.5 m를 저하시킨 4.5 m를 적용하였다. Table 1은 함안보 설치 후의 흐름 및 하상변동 모의와 하류단 수위저하에 따른 하상안정화 효과 모의시 유량, 하류단 수위 그리고 지속기간에 대한 모의조건을 정리한 것이다. 또한 하폭이 급격히 축소되어 하상변동이 크게 발생하는 구간의 평면적 지형변화를 통한 하상안정화 효과를 평가하기 위해 Fig. 2와 같은 하폭 확대지형을 구축하였으며 이때의 모의조건은 유량

1,000 m<sup>3</sup>/s, 하류단 수위 5.0 m를 적용하고 지속기간 30일 동안의 하상변화를 모의하였다.

#### 4. 모의 결과분석

##### 4.1 함안보 설치 후 하상변동 및 문제점

함안보 설치 후 유량이 1,000 m<sup>3</sup>/s(연평균 30일 발생)일 때의 초기하상에서의 흐름결과는 Fig. 3과 같다. 유속분포(Fig. 3(a))를 살펴보면 모의구간 최상류단에서부터 하폭이 확대되기 전까지의 유속은 0.175 m/s에서 0.576 m/s의 분포를 보이며, 하폭의 확대로 유속이 급격히 감소하여 0 m/s에서 0.466 m/s의 값을 보이다가 하류로 갈수록 점차 하폭이 축소되어 0.238 m/s에서 0.566 m/s의 유속이 발생하였다. 최대유속은 0.833 m/s로 하폭이 가장 좁은 함안보 상류 0.78 km 지점에서 발생하였다. 유량 500 m<sup>3</sup>/s와 2,000 m<sup>3</sup>/s의 경우 1,000 m<sup>3</sup>/s일 때와 최대유속이 발생한 지점이 동일하였으며 유속분포는 각각 최소 0 m/s에서 최대 0.417 m/s, 유량이 2,000 m<sup>3</sup>/s 일 때 최소 0 m/s에서 최대 1.661 m/s의 값을 나타냈다. 유량이 500 m<sup>3</sup>/s 일 때 최상류단에서 하폭이 확대되기

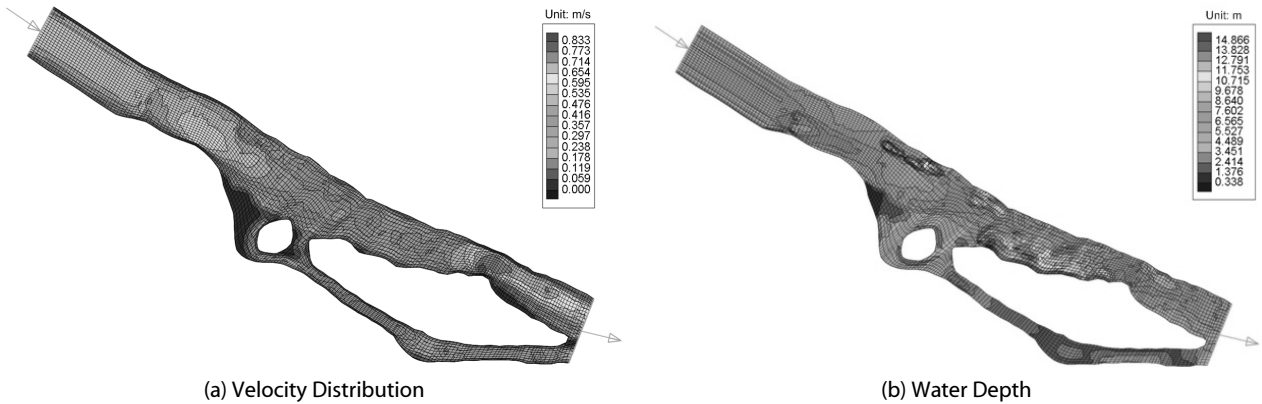


Fig. 3. Velocity and Water Depth Distribution for Initial Bed Condition (Q = 1,000 m<sup>3</sup>/s)

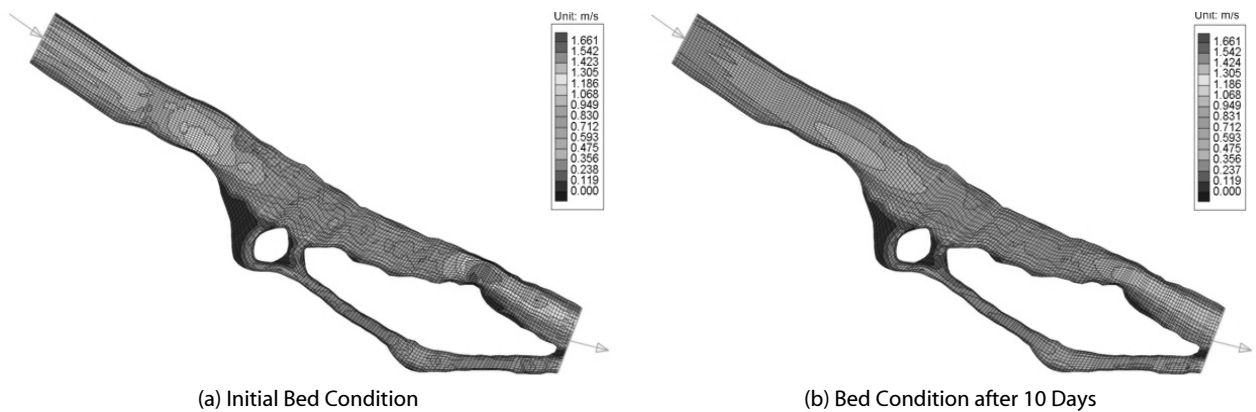


Fig. 4. Velocity Distribution for Q = 2,000 m<sup>3</sup>/s

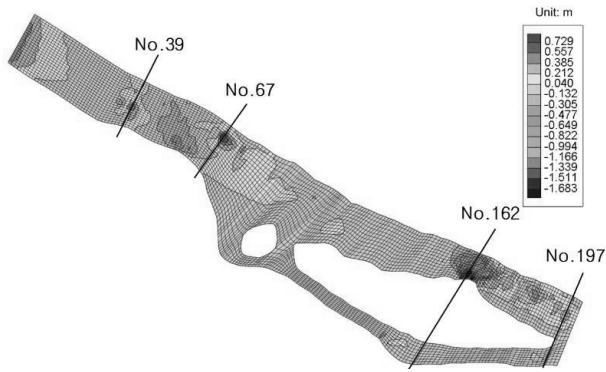
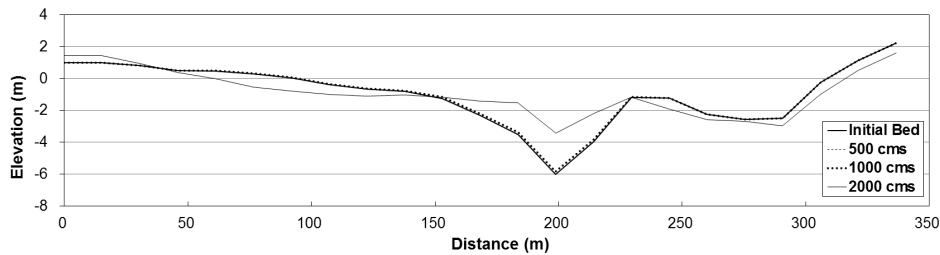


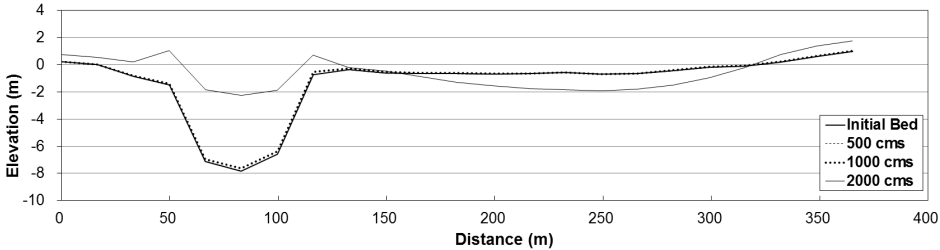
Fig. 5. Cross Sections for Comparison of Bed Changes after 30 Days ( $Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

전까지의 수심은 6 m에서 8 m 사이의 분포를 보이다가 하폭이 확대되는 구간의 좌안에서 약 13 m로 수심이 깊어진다. 하폭이 확대되는 구간에서 하폭이 가장 좁은 지점까지의 수심은 9 m에서 14 m의 분포를 보인다(Fig. 3(b)).

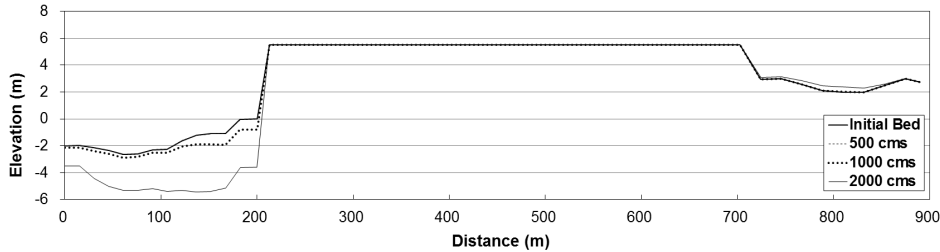
초기하상과 하상변동이 발생한 후의 하상에서의 유속분포를 비교하기 위해  $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$  유량이 발생한 경우 초기지형에서의 유속분포와 10일간 지속적으로  $2,000 \text{ m}^3/\text{s}$  유량이 발생한 후 변화된 하상에서의 유속분포를 Fig. 4와 같이 비교하여 나타내었다. 전반적으로 초기하상에서의 유속에 비해 10일 후 변화된 하상에서의 유속이 느리게 나타났으며, 단면이 축소되는 곳에서의 최대유속은 각각 1.661 m/s, 1.241 m/s로 0.42 m/s 감소되었고 초기하상의



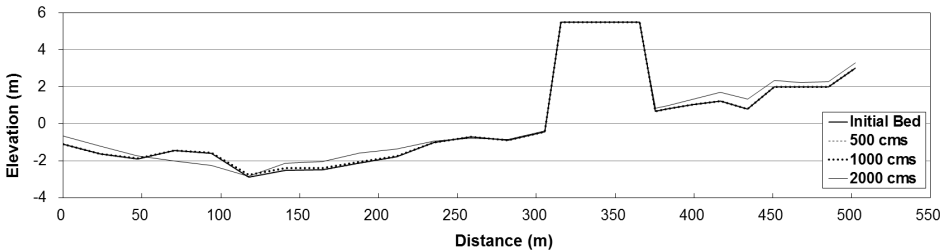
(a) Cross Section No. 39



(b) Cross Section No. 67



(c) Cross Section No. 162



(d) Cross Section No. 197

Fig. 6. Cross Section for Bed Changes Comparison after 10 Days

최대유속이 약 25% 빠르게 나타났다. 500 m<sup>3</sup>/s와 1,000 m<sup>3</sup>/s의 경우도 초기하상의 유속에 비해 지속기간이 지날수록 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지속기간동안 발생한 하상변동에 의한 영향일 것으로 판단된다.

함안보 설치 후 500 m<sup>3</sup>/s, 1,000 m<sup>3</sup>/s, 2,000 m<sup>3</sup>/s의 유량이 각각 발생했을 때의 하상변동 결과를 살펴보면 유량 500 m<sup>3</sup>/s의 경우 10일, 30일, 90일의 지속기간 동안 발생한 최대 침식고(-)는 지속기간별로 각각 -0.8 cm, -2.4 cm, -7.7 cm로 보 상류 0.78 km 지점에서 나타났으며 최대 퇴적고는 모의구간 최상류단에서 1.43 m로 나타났다. 유량 1,000 m<sup>3</sup>/s에 대해 지속기간 10일, 20일, 30일을 적용하여 모의한 결과 최대 침식고(-)는 보 상류 0.78 km에서 지속기간별로 각각 -0.839 m, -1.331 m, -1.683 m로 나타났다. 최대 퇴적고의 경우 보 상류 2.6 km 지점에서 발생하였으며 지속기간별로 각각 0.231 m, 0.470 m, 0.729 m가 퇴적되었다. 유량 2,000 m<sup>3</sup>/s 적용시 최대 침식고(-)와 퇴적고가 발생한 위치는 유량 500 m<sup>3</sup>/s와 1,000 m<sup>3</sup>/s를 적용시켰을 때와 동일하게 나타났으며 지속기간 1일, 3일, 10일 동안 발생한 최대 침식고는 지속기간별로 -0.81 m, -2.078 m, -4.311 m로 나타났다. 최대 퇴적고의 경우 지속기간별로 0.78 m, 2.119 m, 5.557 m로 나타나 침식과 퇴적 모두 지속기간이 지남에 따라 2배 이상의 하상변동이 발생하였다.

함안보 설치 후 유량 1,000 m<sup>3</sup>/s일 때 하상변동이 크게 발생한 단면의 위치는 Fig. 5와 같다. 유량 500 m<sup>3</sup>/s와 2,000 m<sup>3</sup>/s의 경우에도 하상변동이 크게 발생한 단면의 위치는 동일한 것으로 나타났으며 모의 구간에서의 각 횡단면 위치는 함안보로부터 상류 3.3 km 지점(39번 단면), 2.6 km 지점(67번 단면), 0.78 km 지점(162번 단면)과 0.15 km 지점(197번 단면)이다.

모의 유량에 따른 횡단면 하상변화를 알아보기 위해 동일한 지속기간인 10일이 경과한 후 하상변동 결과를 Fig. 6과 같이 비교하였다. 유량 500 m<sup>3</sup>/s의 경우 10일 후 하상변동은 거의 없었으며, 1,000 m<sup>3</sup>/s의 유량이 10일 동안 발생한 경우 최대 퇴적고는 보 상류 2.6 km 지점인 67번 단면에서 0.231 m로 나타났고 최대 침식고는 보 상류 -0.78 km 지점인 162번 단면에서 -0.893 m로 나타났다. 39번과 197번 횡단면에서는 하상변동이 상대적으로 크지 않았다. 유량 2,000 m<sup>3</sup>/s가 10일 동안 발생한 경우에는 비교된

모든 횡단면에서 하상변동이 발생했으며 최대 퇴적고는 5.557 m, 최대 침식고는 -4.311 m로 유량 1,000 m<sup>3</sup>/s일 때와 동일한 지점인 67번과 162번 단면에서 나타났다. 특히, 2,000 m<sup>3</sup>/s의 경우 39번과 67번 단면에서 초기하상일 때의 주수로에서 퇴적이 크게 발생하였고 좌안과 우안에서의 침식이 나타나 지속기간이 길어질수록 주수로의 위치가 이동하는 현상이 나타날 것으로 예상되었다.

Fig. 7은 초기하상과 각 유량별 지속기간 10일 후의 종단면 하상고를 비교한 것이다. 종단면도는 모의구간 내 각 횡단면에서의 최심하상고를 나타낸 것이다. 유량 500 m<sup>3</sup>/s의 경우 하상변동은 거의 없었으며 1,000 m<sup>3</sup>/s의 경우 하폭이 축소되는 보 상류 0.65 km에서 0.85 km 구간에서는 침식현상 나타났으며, 그 외 나머지 구간에서의 하상변동은 거의 없었다. 2,000 m<sup>3</sup>/s의 경우 거의 모든 구간에서 하상변동이 크게 나타났고 최심하상고의 상승이 가장 크게 나타난 구간은 보 상류 2.6 km에서 2.7 km 구간이며 약 2 m에서 5 m의 변화가 발생하였다. 최심하상고가 초기하상에 비해 더욱 깊어진 경우는 보 상류 0.32 km에서 0.95 km 구간과 2.7 km에서 3.1 km 구간에서 나타났다. 3.5 km 이상의 최상류구간의 하상고 침식은 수치모의상 유입유사량의 공급이 부족하여 발생한 경계조건의 영향에 의한 것이므로 결과 분석에서는 제외하였다.

#### 4.2 수위저하와 하폭확대를 통한 하상안정화 방안 분석

본 연구에서는 함안보 상류 하상의 안정화 방안에 대한 검토를 위해 하류단 수위(H<sub>d</sub>)저하에 따른 흐름 및 하상변동을 모의하고 보 상류 하폭이 급격히 축소되어 지속적인 침식현상이 예상되는 지점의 하폭을 확대하여 하상변동을 모의하였다.

하류단 수위저하에 따른 흐름을 분석하기 위해 유량 1,000 m<sup>3</sup>/s일 때 하류단 관리수위 5.0 m 운영 될 경우와 0.5 m 수위 저하를 통해 하류단 수위가 4.5 m로 운영될 경우에 대해 수치모의를 수행하고 유속분포를 Fig. 8과 같이 비교하였다. 하류단 수위 저하시 모의구간 전체에 걸쳐 유속분포가 5.0 m일 때 보다 빠르게 나타났다. 최대유속의 경우 하폭이 축소되는 보 상류 0.78 km 지점(162번 단면)에서 하류단 수위가 5.0 m일 때 0.833 m/s, 4.5 m일 때 0.920 m/s로 나타났다. 유량 500 m<sup>3</sup>/s의 경우와 2,000 m<sup>3</sup>/s의

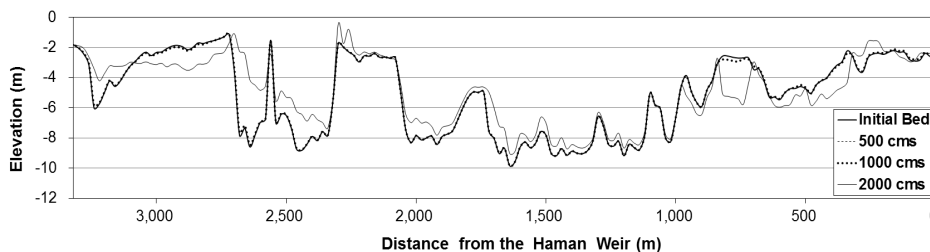


Fig. 7. Comparison of Thalweg Line Changes (Flow Direction →)

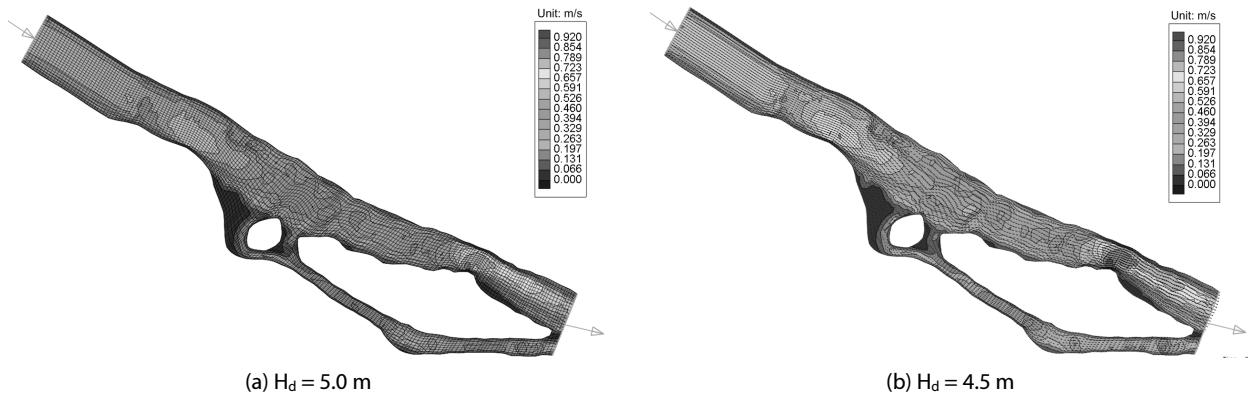


Fig. 8. Velocity Distribution for the Initial Bed Condition ( $Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

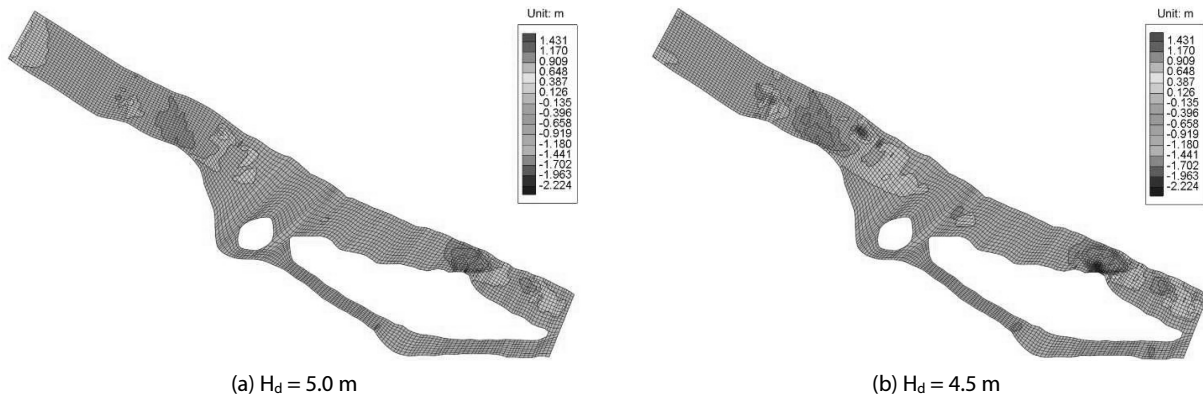


Fig. 9. Bed Change Comparison with Different Downstream Water Levels after 30 Days ( $Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Table 2. Comparison of Bed Change of Cross Sections by Different Downstream Water Level ( $H_d$ )

| Cross Section No. | Q | 500 $\text{m}^3/\text{s}$ (after 90 Days) |            | 1,000 $\text{m}^3/\text{s}$ (after 30 Days) |          | 2,000 $\text{m}^3/\text{s}$ (after 10 Days) |          |
|-------------------|---|---|------------|---|----------|---|----------|
|                   |   | $H_d$                                     | 5.0 m      | 4.5 m                                       | 5.0 m    | 4.5 m                                       | 5.0 m    |
| No. 39            |   | 0.00129 m                                 | 0.00982 m  | 0.578 m                                     | 1.197 m  | 2.601 m                                     | 2.679 m  |
| No. 67            |   | 0.000149 m                                | 0.000936 m | 0.729 m                                     | 1.431 m  | 5.557 m                                     | 6.622 m  |
| No. 162           |   | -0.00947 m                                | -0.0264 m  | -1.683 m                                    | -2.224 m | -4.311 m                                    | -4.776 m |
| No. 197           |   | 0.00221 m                                 | 0.00922 m  | 0.323 m                                     | 0.495 m  | -0.556 m                                    | -0.981 m |

경우에서도 하류단 수위를 저하시켰을 때 전반적으로 유속분포가 빠르게 나타났으며, 하류단 수위 저하시 유량 500  $\text{m}^3/\text{s}$ 일 때 최대유속은 0.462 m/s, 2,000  $\text{m}^3/\text{s}$ 일 때 최대유속은 1.831 m/s로 나타나 하류단 수위 5.0 m일 때보다 최대유속이 10% 정도 빠르게 나타났다.

하류단 수위저하에 따른 하상변동 모의결과를 분석하기 위해 1,000  $\text{m}^3/\text{s}$  유량이 발생하고 하류단 수위가 각각 5.0 m일 때와 4.5 m으로 운영될 경우에 대해 지속기간 30일 후의 하상변동을 비교하였다(Fig. 9). 하류단 수위를 저하 시켰을 경우 침식 혹은 퇴적 등의 하상변동이 크게 발생한 지점은 함안보 설치 후 하상변동

결과에서 나타난 지점(Fig. 5)과 동일하였다. 39번 단면에서 하류단 수위 5.0 m일 때는 0.578 m의 퇴적이 발생했으며 4.5 m일 때 1.197 m의 퇴적이 발생했다. 67번 단면과 197번 단면에서도 퇴적이 발생했으며 5.0 m일 때 0.729 m와 0.323 m, 4.5 m일 때 1.431 m와 0.495 m로 나타났다. 하폭이 가장 좁은 구간인 67번 단면에서는 침식이 발생하였으며 5.0 m일 때 -1.683 m, 4.5 m일 때 -2.224 m의 침식이 발생했다. 하상변동이 큰 단면들에 대해 모의 유량별 하류단 수위저하 전과 후의 최대 침식 및 퇴적고를 Table 2에서 비교하였다.

본 연구에서는 하상안정화 방안의 검토를 위해 하류단 수위저하



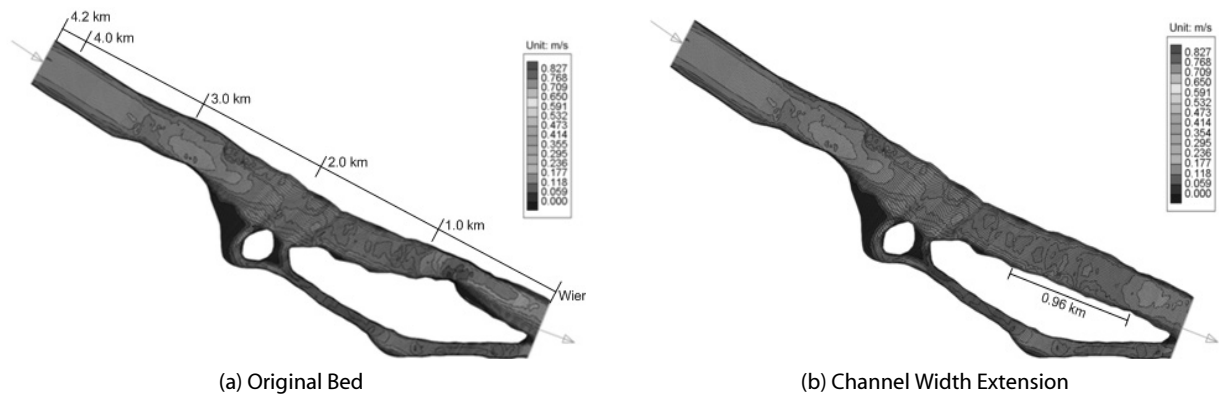


Fig. 10. Velocity Distribution for the Initial Condition ( $Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

Table 3. Comparison of Velocity and Bed Changes by Time for No. 162 Section ( $Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

| Geometry Condition      | Velocity (m/s) |               |               |               | Bed Change (m) |               |               |
|-------------------------|----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
|                         | Initial Bed    | after 10 Days | after 20 Days | after 30 Days | after 10 Days  | after 20 Days | after 30 Days |
| Original Bed            | 0.827          | 0.745         | 0.696         | 0.661         | -0.941         | -1.491        | -1.869        |
| Channel Width Extension | 0.440          | 0.441         | 0.441         | 0.443         | 0.012          | 0.013         | 0.008         |



Fig. 11. Bed Change Comparison after 30 Days ( $Q = 1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ )

를 적용한 방법뿐만 아니라 하폭이 급격히 축소되어 지속적인 침식현상이 예상되는 No. 162 지점의 하폭을 확대하는 방법에 대한 하상안정화 효과를 분석하였다. 하폭이 급격히 좁아지는 지점(보 상류 0.78 km 지점, No. 162)의 하폭을 Fig. 2와 같이 확대하여 유량  $1,000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 하류단 수위 5.0 m, 지속기간 10일, 20일, 30일에 대해 수치모의를 실시하였다.

하폭 확대 전과 후 초기조건에서의 유속분포(Fig. 10)는 모의구간 최상류단부터 하폭 확대가 시작되는 보 상류 1.32 km 지점(Fig. 10(a))까지는 동일하게 나타났다. 하폭 확대가 적용된 구간에서 최대유속을 비교해 보면 원지형에서의 최대유속은  $0.827 \text{ m/s}$ 로 나타났으며 하폭 확대 후 동일한 지점에서 유속은  $0.431 \text{ m/s}$ 로 유속이 약 50% 감소한 것으로 나타났다. 또한 하폭을 확대하지

않고 30일 동안 하상변동을 모의한 후 최종 지형에서의 유속과 비교해 본 결과, 하폭이 가장 좁은 보 상류 0.78 km 지점의 유속은, 원하상(Original Bed)에서는 유속이  $0.827 \text{ m/s}$ , 하폭확대가 적용되지 않은 경우  $0.661 \text{ m/s}$ , 하폭 확대 후의 경우 지속기간에 상관없이  $0.440 \text{ m/s}$ 의 유속을 유지하였다(Table 3).

하폭이 좁은 단면(No. 162)의 하폭 확대에 따른 하상변동 분석을 위해 원지형에서의 하상변동 결과와 하폭확대 후의 하상변동 결과 값을 Fig. 11과 같이 비교하였다. 모의구간 최상류단부터 하폭 확대가 시작되는 지점(보 상류 1.32 km 지점)까지 하상변동 크기와 양상에는 변화가 없었다. 하폭 확대가 적용된 구간에서는 원하상에서 최고 침식고가 하폭이 가장 좁은 보 상류 0.78 km 지점(No. 162)에서  $-1.869 \text{ m}$ 로 나타났으며 하폭 확대 후에는 동일한 지점에

서 0.008 m의 퇴적이 발생하여 하폭 확대 후 하상변동이 거의 발생하지 않는 것을 확인하였다. 원하상에서 No. 162 단면의 지속기간별 침식고를 살펴보면 10일 후 -0.941 m에서 30일 후 침식고가 -1.869 m로 증가한 반면, 하폭 확대 후 하상의 경우 지속기간에 상관없이 하상변동이 거의 발생하지 않았다. 지속기간에 따른 하폭 확대 후 유속변화와 하상변동은 Table 3과 같다.

### 4.3 토의

함안보 설치에 따른 흐름 및 하상변동을 모의한 결과를 분석해 보면 횡단면 39번, 67번, 197번 단면에서는 유량 2,000 m<sup>3</sup>/s일 때를 제외하고 모두 퇴적이 발생하였으며 162번 단면에서는 모든 모의유량과 지속기간에 관계없이 침식이 발생하였다. 또한 유사가 퇴적되는 구간과 침식되는 구간에서 동일한 현상이 지속적으로 발생하는 것을 확인할 수 있으며 특히 하폭이 축소되는 구간 162번 단면에서의 침식은 적용유량의 증가와 지속기간이 길어짐에 따라 지속적인 침식이 예상되어 차후 사면파괴 등의 하도 평면적 변화가 발생할 가능성이 클 것으로 판단된다. 이에 따라 하류단 수위저하에 따른 하상변동을 함안보 설치 후 하상변동과 비교함으로써 하상의 안정화 효과를 분석한 결과, 침식고와 퇴적고의 정량적인 차이는 있었으나 침식현상과 퇴적현상이 발생하는 위치가 동일하여 하상이 안정화되는 효과는 확인할 수 없었다. 따라서 하상안정화의 대처방안으로 보 상류 하폭이 가장 좁은 곳(No. 162)의 하폭을 확대시켜 하상변동을 제어하는 방법을 제안하고 2차원 수치모형을 이용하여 흐름 및 하상변동 모의를 실시하였다. 모의 결과, 하폭을 확대한 구간에서의 유속은 원지형에서의 유속보다 50% 감소하였으며 지속기간에 상관없이 일정한 유속을 유지하였다. 또한 적용유량과 지속기간에 상관없이 침식이 발생하는 162번 단면에서의 하상변동 또한 1 cm 이하인 것으로 평가되어 하상의 변화가 거의 발생하지 않아 하상안정화 효과가 있는 것으로 확인하였다.

## 5. 결론

본 연구에서는 CCHE2D 모형을 이용하여 낙동강 함안보 설치 후 상류하도에서의 흐름 및 하상변화를 모의하였으며 하상의 안정화를 위한 방안들을 적용하여 정량적으로 분석하였고 그 결론은 다음과 같다.

첫째, 함안보 설치 후 흐름 및 하상변동에 대해 모의유량 크기와 발생 가능한 지속기간별로 민감도 분석을 실시하였으며 흐름 모의 결과에서 초기하상과 하상변동이 발생한 후의 하상에서의 유속분포를 비교했을 때 전반적으로 초기하상에서의 유속에 비해 일정 지속기간이 지난 후 변화된 하상에서의 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 이는 지속기간동안의 하상변화로 인한 영향으로 판단된

다. 또한, 전체 모의구간에서 하상변동이 크게 발생한 지점의 위치가 모든 적용유량에서 동일하게 나타났으며 최대 퇴적고는 보 상류 2.6 km(No. 67) 지점에서, 최대 침식고는 보 상류 0.78 km(No. 162) 지점에서 발생하였다. 모의유량과 지속기간이 증가함에 따라 퇴적되는 단면에서는 퇴적이, 침식되는 단면에서는 침식이 가중되어 발생하는 것을 확인하였다. 한편, 유량 2,000 m<sup>3</sup>/s가 10일 동안 발생한 경우, 39번과 67번 단면에서 주수로에 상당한 퇴적이 발생하고 좌안과 우안에서 침식이 나타나 지속기간이 길어질수록 주수로 위치의 변동이 있을 것으로 예상되었다.

둘째, 하류단 수위저하를 통한 보 상류 하상안정화 효과를 확인하기 위해 함안보 설치 후 하류단 수위 조건을 관리수위에서 0.5 m 저하시킨 4.5 m를 적용시켜 모의하였다. 모든 유량조건에서 하류단 수위 저하시 유속분포가 관리수위 5.0 m일 때보다 전반적으로 빠르게 나타났다. 하류단의 수위를 저하 시켰을 경우 하상변동이 크게 발생한 지점은 함안보 설치 후 관리수위일 때의 하상변동 결과에서 나타난 지점과 동일하였다. 또한 유사가 퇴적되는 구간과 침식되는 구간에서 동일한 현상이 지속적으로 발생하는 것을 확인하였다.

셋째, 하폭의 급격한 축소로 인해 지속적인 침식현상이 예상되는 지점의 하폭을 확대함으로써 발생하는 하상안정화 효과를 확인하기 위해 원하상과 하폭 확대 후의 하상에서의 흐름 및 하상변동 결과를 분석하였다. 모의구간 최상류단부터 하폭확대가 시작되는 보 상류 1.32 km 지점까지는 유속분포와 하상변동의 양상과 결과 값은 동일하게 나타났다. 그러나 하폭확대가 이루어진 구간에서의 최대유속의 경우, 원지형에서 0.827 m/s, 하폭 확대 후 지형에서 0.431 m/s로 나타나 최대유속이 약 50% 감소한 것으로 나타났다. 원하상에서의 최대 침식고는 보 상류 0.78 km 지점에서 -1.869 m로 나타난 반면, 하폭 확대 후 하상변동(0.008 m 퇴적)은 거의 발생하지 않았다.

함안보 설치 후의 하상변동 및 하상안정화 방안 검토에 관한 수치모의 연구 결과, 모든 모의유량과 발생 가능한 지속기간에서 하상변동이 큰 지점이 동일한 것을 확인할 수 있었으며 하류단 수위 저하와 관계없이 하폭이 급격히 좁은 지점에서 지속적인 침식이 예상된다. 따라서 2차원 하상변동 모의의 경우 평면적 지형의 횡단적 변화가 허용되지 않는 고정된 지형경계가 적용되는 한계가 있기 때문에 함안보 건설 후 2차원 수치모의에서 나타난 하폭이 좁은 구간에서 발생하는 지속적인 하상침식은 실제 하천에서는 하안침식과 같이 발생할 가능성이 크다. 이에 하폭이 가장 좁아지는 구간의 하폭을 확대함으로써 침식이 지속적으로 나타나는 지점의 하상변화를 현저히 완화시킬 수 있으며 하도의 평면적 변화를 최소화하고 궁극적으로 하상의 안정화를 유도할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업(11기술혁신C06) 및 한국건설기술연구원 2013년 주요사업(2013-0327)의 연구비지원에 의해 수행되었으며, 연구내용의 일부는 제 3저자의 명지대학교 대학원 토목환경공학과 2013년 석사논문에 포함된 내용입니다.

## References

- Ackers, P. and White, W. R. (1973). "Sediment transport: New approach and analysis." *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 99, No. 11, pp. 2041-2060.
- Engelund, F. A. and Hansen, E. (1967). *Monograph on sediment transport in Alluvial Streams*, Teknisk Forlag (in Denmark).
- Garbrecht, J., Kuhnle, R. A. and Alonso, C. V. (1995). "A sediment transport formulation for large channel networks." *Journal of Soil and Water Conservation*, Vol. 50, No. 5, pp. 517-579.
- Han, S. W. (2010). *Numerical analysis for bed changes due to sediment transport capacity formulas and sediment transport modes using the CCHE2D model*, Master Thesis, Myongji University (in Korean).
- Jeong, J. H. and Yoon, Y. N. (2009). *Water resources design practice*, Goomibook (in Korean).
- Ji, U., Julien, P. Y. and Park, S. K. (2011a). "Sediment flushing at the Nakdong river estuary barrage." *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 137, No. 11, pp. 1522-1535.
- Ji, U., Kim, G. H. and Yeo, W. K. (2011b). "Analysis for the effectiveness of sedimentation reduction using the channel contraction method at the estuary barrage." *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 1, pp. 31-40.
- Ji, U., Yeo, W. K. and Han, 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).
- Kim, G. H. (2011). *Numerical analysis for sedimentation reduction methods at the upstream channel of the estuary barrage*, Master Thesis, Myongji University (in Korean).
- Kim, J. S. (2007). *A study of the stream specific by river width's downsizing & extension*, Master Thesis, Kangwon National University (in Korean).
- Korea Water Resource Association. (2005). "14th hydraulic workshop hand book." *Korea Water Resources Association* (in Korean).
- Korea Water Resources Corporation. (2010). *Practical design report of Nakdong river restoration project(Changnyeong 2 and Hanan 1 district)*, Korea Water Resources Corporation (in Korean).
- Kwon, Y. S. (2013). *Numerical analysis on bed changes considering variation of channel width and bank erosion*, Master Thesis, Myongji University (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport. (2009). *River master plan report (Modified) of Nakdong river basin*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2010). *Hydrological annual report in Korea (2009)*, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (in Korean).
- Teal, M. J. and Remus, J. I. (2001). "Lake sharpe sediment flushing analyses." *World Water and Environmental Resources congress 2001*, Orlando, Florida, pp. 1-8.
- Wu, W., Wang, S. S. Y. and Jia, Y. (2000). "Nonuniform sediment transport in alluvial river." *Journal of Hydraulic Research*, IAHR, Vol. 38, No. 6, pp. 427-434.
- Yu, K. K. and Woo, H. S. (1990). "Comparative evaluation of some selected sediment transport formula." *Journal of Korean Society of Civil Engineering*, KSCE, Vol. 10, No. 4, pp. 67-75 (in Korean).