

# 낙동강하구둑 상류 접근수로에서의 유사량 공식 및 유사 이송형태에 따른 하상변동 수치모의에 관한 연구

## 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

지 운\* / 여 운 광\*\* / 한 승 원\*\*\*

Ji, Un / Yeo, Woon Kwang / Han, Seung Won

### Abstract

The effects of the selection for sediment transport equations and advection-diffusion equations according to different sediment transport modes on the modeling results of bed changes were analyzed using the CCHE2D and compared with field data in this paper. The most suitable sediment transport equation and sediment transport mode for advection-diffusion equation were suggested for the upstream approached channel of the Nakdong River Estuary Barrage. The bed changes simulated by the Engelund and Hansen formula were very small in the modeling case for the low and high flow discharges compared with the case of the Ackers and White formula. Also, the numerical modeling with the actual hydraulic event in 2002 presents that the bed change result with the bed load transport type for advection-diffusion equation was close to the field measurement more than the suspended load type.

**Keywords:** Nakdong River Estuary Barrage, sediment transport equation, sediment transport mode, bed change modeling, CCHE2D model

### 요 지

본 논문에서는 2차원 하상변동 수치모형인 CCHE2D 모형을 이용하여 유사량 공식과 유사 이송형태별 이류-확산 방정식의 선택이 하상변동 수치모의결과 값에 미치는 영향을 분석하고 실제 현장자료와 비교하였다. 또한 이러한 분석을 기초로 낙동강하구둑 상류 접근수로에서의 최적의 유사량 공식과 유사 이송형태별 이류-확산 방정식을 제안하였다. 낙동강하구둑 상류 접근수로에 대해 Ackers and White와 Engelund and Hansen의 유사량 공식과 소류사와 부유사 유사 이송형태에 따른 이류-확산 방정식을 각각 다르게 적용하여 모의한 결과, Engelund and Hansen 공식을 적용한 경우에는 Ackers and White 공식을 적용한 경우와 비교했을 때, 평수 및 홍수 조건에서 모두 하상변동량이 거의 없는 것으로 나타났다. 또한 Ackers and White 공식으로 2002년에 발생한 실제 수문사상을 적용하여 하상변동 모의한 결과, 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용한 모의결과가 부유사 이송형태를 적용했을 경우 보다 실제 하상변동에 더 근접한 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** 낙동강하구둑, 유사량 공식, 유사 이송형태, 하상변동 모의, CCHE2D 모형

\* 명지대학교 토목환경공학과 연구 교수 (e-mail: jiuncivil@gmail.com)

Research Professor, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin-si, Korea

\*\* 명지대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail: yeo@mju.ac.kr)

Professor, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin-si, Korea

\*\*\* 교신저자, 명지대학교 토목환경공학과 대학원, (e-mail: wony723@mju.ac.kr)

Graduate School, Dept. of Civil and Environmental. Engrg., Myongji Univ., Yongin-si, Korea

## 1. 서 론

낙동강 하구에는 염수침입을 방지하고 안정적인 용수 공급과 유량확보 및 하천연안의 배수와 홍수문제를 개선하기 위해 하구둑이 건설되었다. 그러나 상류로부터 유입되는 흐름의 유속이 하구둑 주변에서 감소함으로써 유사가 하구둑 상류지역에 퇴적되는 문제가 발생하였다. 이러한 유사 퇴적은 홍수위 상승과 같은 여러 문제의 원인이 되기 때문에 이를 해결하기 위해 하구둑 건설 후 상류 접근수로 구간에서 매년 준설을 수행하고 있다(한국수자원공사, 2008). 또한 최근에는 기존의 준설방법 이외에 하폭이 급격히 확대되는 구간의 하폭을 축소하는 방법, 격년제 준설방법, 수문조작을 통한 유사 플리싱 방법 등이 새롭게 제안되고 있는 실정이다(Ji, 2006). 이러한 퇴사 저감 및 제거를 위한 효율적인 대책을 선정하기 위해서는 각 대책별 유사 이송 및 하상변동 양상 등을 정량적으로 예측 및 분석해야 할 필요가 있다.

현재 하천에서의 유사 이송과 하상변동을 분석하는 대표적인 방법으로는 현장에서 측정하는 자료를 이용하거나 수치모형 또는 수리모형 실험을 이용하는 방법들이 있다. 현장 측정자료를 이용하는 방법은 실제현상을 직접 분석할 수 있다는 장점이 있지만 측정기구 및 방법의 시간적, 공간적인 제약으로 인해 측정이 불가능한 경우가 많다. 이를 보완할 수 있는 방법으로 자연현상을 일정한 상사를 적용하여 모형으로 제작한 후 실험을 수행하는 수리모형 실험 방법이 있으나 자연하천의 흐름이나 하상토 크기 및 분포 등을 상사율을 적용하여 재현하는데 많은 어려움이 있다. 또한, 자연현상을 지배방정식과 수치계산을 적용하여 분석하는 수치모형 실험은 타 방법들에 비해 손쉽게 여러 흐름 조건이나 하상토 분포 등을 다양하게 적용시킬 수 있는 장점이 있지만 자연현상의 원리를 정의하는 지배방정식의 한계 및 반복적인 수치계산 상의 오차 등이 발생할 수 있다. 특히 유사 이송 및 하상변동 수치모의를 수행할 경우 지배방정식인 유사량 공식의 선택과 유사 이송방식에 따른 이류-확산 방정식의 형태에 따라 결과 값이 다르게 산정되기도 한다.

하천에서의 유사량을 예측하기 위해 사용되는 공식은 현재 개발되어 있는 것만 해도 수십 개가 되며 각 공식에 따른 유사량이 동일한 수리조건에서도 개발에 적용된 자료의 특성 및 기본 이론에 따라 각각 다르게 산정되고 있다(Nakato, 1990). 많은 연구자들이 실제 하천에서 측정된 유사량 자료와 유사량 공식으로 산정한 유사량 값을 비교하는 연구를 수행해 왔으며 이러한 연구 결과에 의하면 어떠한 유사량 공식을 적용하는지에 따라 유사량이 다르게 산정된다는 것을 알 수 있다(White et al., 1973;

ASCE, 1982; 한국건설기술연구원, 1989; 이길성과 이남주; 1992). 한 지점에서 산정된 유사량 값이 선택된 공식에 따라 달라지면 그 유사가 다른 지점으로 이동하게 되면서 발생하게 되는 하상변동 크기 또한 수치모의 상에서 다르게 산정된다. 유사량 공식을 다르게 적용함으로써 하상변동이 어떻게 달라지는지에 대한 연구들이 Zeng et al. (2006)과 Huang (2007) 등에 의해 수행되었으며 주로 2차원 수치모형의 하상변동 모의결과와 실험실 수로에서의 하상변동을 비교하였다. 수치모의시 하상변동 결과 값에 영향을 미치는 요인으로 유사량 공식의 선정뿐만 아니라 유사 이송방식에 따른 이류-확산 방정식의 형태 또한 고려해야 할 요소이다. 이류-확산 방정식은 소류사, 부유사, 총유사의 유사 이송형태에 따라 방정식의 기본 형태가 달라지며 이러한 이류-확산 방정식의 형태가 달라지면 하상변동 모의결과 또한 차이가 발생할 것으로 예측된다. 따라서 하상변동 모의시에는 유사량 공식뿐만 아니라 유사 이송형태 또한 수치계산에서 반드시 고려되어야 할 것이다.

본 논문의 대상구간인 낙동강하구둑 상류 접근수로에서는 유사량 현장자료의 부족으로 인해 일반적으로 행해지는 현장 측정자료와 여러 유사량 산정 공식에 의해 계산된 유사량 값을 상호 비교하는 방법만으로는 하상변동 수치모의를 위한 최적의 유사량 공식을 평가하는데 문제점이 있다. 따라서 1차적으로 유사량 공식 평가에서 선별된 공식을 수치모의에 적용하여 하상변동량 자체를 현장자료와 검증함으로써 이러한 문제점을 해결하였다. 대부분의 유사량 공식 평가 및 산정은 하상변동 수치모의에서 사용할 최적의 공식을 선택하기 위한 작업이므로 낙동강 하구둑과 같이 유사량 현장자료는 부족하나 하상변동에 대한 현장 측정이 매년 이루어지는 지역에서는 직접적으로 수치모의를 통한 하상변동 값과 현장에서 관측한 하상변동 값을 비교함으로써 수치모의의 신뢰도를 높일 수 있다. 본 연구의 목적은 낙동강하구둑 상류 접근수로에서의 하상변동 예측을 위한 최적의 유사량 공식과 유사 이송형태별 이류-확산 방정식을 선정하기 위해 CCHE2D 모형을 이용하여 유량크기별 하상변동 민감도 분석과 실제 수문사상을 적용한 하상변동 모의를 수행하기 위한 것이다.

## 2. 대상하천의 개요

낙동강 하류 서부산에 위치한 낙동강하구둑은 안동댐으로부터 하류 355 km 지점에 위치하고 있으며 바다로부터 상류 8 km 지점에 위치하고 있다. 1983년에 시작한 하구둑 건설은 1997년에 완공되었으며 총연장은 2,230 m(수문부 510 m, 토언제 1,720 m)에 수문은 6개의 주수문과



Fig. 1. Study Reach of the Lower Nakdong River

4개의 조절수문, 1개의 갑문, 그리고 우안배수문으로 구성되어 있다 (한국수자원공사, 2008).

낙동강하구둑 주배수문이 설치된 좌안은 부산시 사하구 하단동에 그리고 우안배수문이 설치된 우안은 부산시 북구 명지동에 접하고 있다. 하구둑은 하구와 강을 분리하여 하구둑 상류로의 염수침입을 방지하며 하구둑 상류는 저수지 역할을 한다 (Fig. 1).

낙동강 유역 조사단은 장래 용수공급을 위해 1966년에서 1972년까지 7년간에 걸친 조사를 통해 낙동강 하구 지역의 염수침입을 영구적으로 방지하는 대책을 검토하였으며 낙동강하구둑의 위치 선정은 염수방지, 하구둑 상류 저수범위, 인근 지역의 배수, 상류와 하류의 수질, 생태학적 측면, 하구둑의 교통 기능과 매립 등을 고려하여 수행하였다 (한국수자원공사, 2008). 낙동강 하구지역 공업단지의 용수 및 김해 곡창지대의 농업용수, 그리고 낙동강 전 유역의 생활·공업용수의 수요 대부분이 하구 지역에 집중되어 있으므로 이들 수요에 맞는 안정적인 용수공급이 필수적이다. 또한 수질오염 등의 환경문제를 해결하기 위한 수자원의 보전과 하천 유량의 적절하고 효과적인 조절이 필요하며 물의 염분도가 높아지면 생활 용수 및 공업용수로 부적합하기 때문에 염분이 포함되어 있지 않는 담수의 공급이 필수적이다. 낙동강 유역 강우량의 계절적인 편중으로 인해 갈수기에는 자연유량으로 용수 수요량을 충족할 수 없으며 홍수기에는 하천연안에 배수와 홍수 등의 문제가 발생하기 때문에 이를 방지하기 위한 대책이 필요하였으며 이에 낙동강하구둑이 건설되었다.

하지만 낙동강하구둑 건설로 인해 하구둑 근처에서의 유속이 감소함으로써 하구둑 상류에 유사가 퇴적되는 문제가 발생하였다. 이러한 퇴사문제를 해결하기 위해 현재 연간  $619,500 \text{ m}^3$ 에 해당되는 퇴사를 커터를 이용한 펌프 준설공법으로 준설하고 있다 (Ji, 2006). 이는 홍수시에 상류 수로의 통수능을 확보하여 홍수위 상승을 방지하기 위

한 것이다. ISWACO-NEDECO (1987)에 의하면 하구둑 상류의 접근수로 (하구둑으로부터 3 km까지)에서 유사 퇴적량이 1 m 이상 되지 않아야 하며 퇴적높이 1 m는 퇴적량 약  $175,000 \text{ m}^3$ 에서  $450,000 \text{ m}^3$ 에 이른다고 한다. 따라서 낙동강하구둑 상류 접근수로서는 하구둑 건설로 인한 지형변화를 관측하기 위해 매년 홍수기 전과 후로 지형측량이 실시되고 있다.

### 3. 수치모의를 위한 유사량 공식 및 유사 이송형태

#### 3.1 유사량 공식

소류사, 부유사, 총유사를 산정하는 유사량 공식 중 소류사를 산정하는 유사량 공식으로는 소류력 개념으로 접근한 Dubois (1879), Shields (1936), Kalinske (1947) 공식과 에너지 경사 개념으로 접근한 Meyer-Peter (Meyer-Peter et al., 1934)와 Meyer-Peter and Müller (1948) 공식, 유량을 이용한 Schoklitsch (1934) 공식, 유속을 이용한 Einstein (1942)와 Einstein and Brown (Brown, 1950) 공식 등이 있다. 부유사를 산정하는 공식으로는 Lane and Kalinske (1941), Einstein (1942), Brooks (1963) 등이 있고 총유사량 공식으로는 Einstein (1942), Modified Einstein (Colby and Hembree et al., 1955), Toffaleti (1969) 공식이 있으며 수류력에 기초한 Bagnold (1966), Engelund and Hansen (1972), Ackers and White (1973), Yang (1973) 공식 등이 있다. 현재까지 여러 연구자들에 의해 다양한 유사량 공식이 개발되어 졌으며 한 지점을 대상으로 산정한 유사량 값은 어떠한 유사량 공식을 적용하였는지에 따라 그 값의 차이가 나타난다.

Ji (2006)는 하구둑으로 인한 배수 영향이 미치지 않는 지점들 중 하구둑과 가장 근접한 진동 지점 (낙동강 하구둑으로부터 약 80 km 상류에 위치)에서 측정된 유사량을 여러 유사량 공식으로 산정한 값들과 비교하는 연구를 수행하였다 (Fig. 2). 그 결과, 기존의 연구들과 같이 진동 지점에서도 유사량 공식에 따라 산정되는 유사량 값의 차이가 나타났으며 Ackers and White (1973), Yang (1973), Shen and Hung (1972), Brownlie (1981) 공식으로 산정한 유사량은 실제 측정된 유사량과 비교적 일치하였고 Engelund and Hansen (1967) 공식으로 산정한 유사량은 다소 과다 산정되는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 진동 지점에서의 유사량과 비슷한 유사량 값을 산정하는 유사량 공식들 중 Ackers and White (1973) 공식과 다소 과다 산정하는 Engelund and Hansen (1967) 공식을 선정하여 유사량 공식에 따른 하상변동 수치모의를 수행하였다.

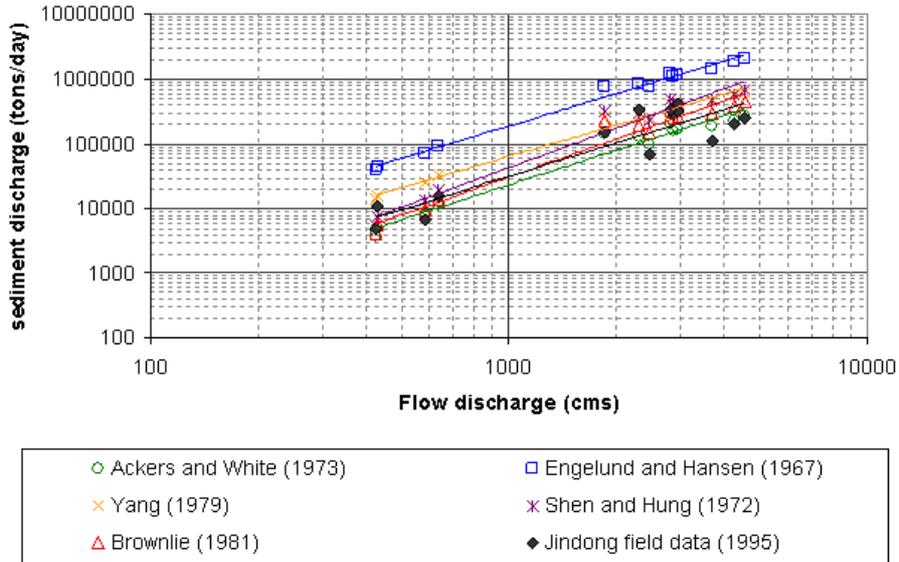


Fig. 2. Comparison of Calculated and Measured Sediment Discharge in Jindong (Ji, 2006)

### 3.2 유사 이송형태에 따른 이류-확산 방정식

충유사는 이송방식에 따라 소류사와 부유사로 나뉘게 되며 소류는 하상 위에서 비교적 큰 유사 입자들이 유수에 의해 구르거나, 미끄러지거나, 뛰어서 이송되는 것이고 부유는 비교적 작은 입자들이 유수의 난류, 확산현상에 의해 이송되는 것이다 (Fig. 3). 이러한 유사 이송형태에 따라 하상변동 모의를 위한 수치모형의 지배방정식인 이류-확산 방정식의 형태가 달라진다.

이류-확산 방정식의 기본 형태는 Eq. (1)과 같으며 유사 이송방식에 따라 소류사 이송형태의 경우 Eq. (2)와 같고 부유사 이송형태의 경우 Eq. (3)의 형태가 된다.

$$\frac{\partial c_k}{\partial t} + \frac{\partial(uc_k)}{\partial x} + \frac{\partial(vc_k)}{\partial y} + \frac{\partial(w_{sk}c_k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(\epsilon_s \frac{\partial c_k}{\partial z}) \quad (1)$$

여기서,  $u, v, w$ : x, y, z 방향의 유속성분,  $c_k$ : k 번째 입경분급의 농도,  $w_{sk}$ : k 번째 입경의 침강 속도,  $\epsilon_s$ : 유사 외확산(eddy diffusivity,  $\epsilon_s = v_t/\sigma_s$ ),  $v_t$ : 와동점성계수,  $\sigma_s$ : 난류 Prandtl-Schmidt 계수 (0.5에서 1.0)이다.

$$\frac{\partial(\delta c_{bk})}{\partial t} + \frac{\partial q_{btx}}{\partial x} + \frac{\partial q_{bty}}{\partial y} + \frac{1}{L_b}(q_{bk} - q_{b^*k}) = -E_{bk} + D_{bk} \quad (2)$$

여기서,  $c_{bk}$ : 소류사 농도,  $q_{btx}, q_{bty}$ : x, y 방향 소류사 수송률,  $q_{bk}, q_{b^*k}$ : 소류사 농도와 수송률,  $E_{bk}$ : 유입되는 유사량,  $D_{bk}$ : 유출되는 유사량,  $L_b$ : 구간거리이다.

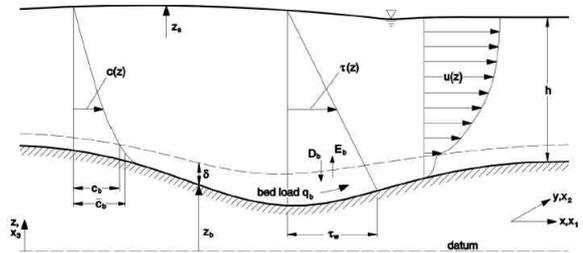


Fig. 3. Sediment Transport Type (Wu, 2002)

$$\frac{\partial(hC_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial(UhC_{tk})}{\partial x} + \frac{\partial(VhC_{tk})}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}(\epsilon_s h \frac{\partial C_{tk}}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(\epsilon_s h \frac{\partial C_{tk}}{\partial y}) + \alpha w_{sk}(C_{t^*k} - C_{tk}) \quad (3)$$

$$(1-p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} = \alpha w_{sk}(C_k - C^*_{*k})$$

여기서,  $C_{tk}, C_{t^*k}$ : 수심-평균된 충유사 농도와 수송률,  $z_{bk}$ : 하상토 두께,  $U, V$ : 수심 적분된 x, y 방향 유속,  $h$ : 수심,  $\alpha$ : 방향여현이다.

또한, 충유사 이송형태가 적용될 경우 이류-확산 방정식은 Eq. (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$(1-p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} = \alpha w_{sk}(C_k - C^*_{*k}) + (q_{bk} - q_{b^*k})/L_b$$

$$(1-p') \frac{\partial z_{bk}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial(hC_{tk})}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{\partial(q_{btx} + q_{sctx})}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \frac{\partial(q_{bty} + q_{scky})}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

여기서,  $C_k, C^*_{*k}$ : 수심-평균된 부유사 농도와 수송률,  $p'$ : 소류사 공극률,  $\bar{c}_{bk}$ : 소류사 구간에서의 소류사 평균 농도,  $C_{tk}$ : 충유사 농도,  $q_{btx} = \alpha_{tx} q_{bk}, q_{bty} = \alpha_{ty} q_{bk}$ : x, y 방향의 소류사 수송률,  $q_{sctx}, q_{scky}$ : x, y 방향의 부유사 수송

를,  $\alpha_{bx}$ ,  $\alpha_{by}$ : 각각  $x$ ,  $y$  방향의 소류사 방향여현이다.

이처럼 유사 이송형태에 따라 이류-확산 방정식의 기본 형태가 다르며 이로 인해 하상변동 모의결과 또한 수치모의시 다르게 산정될 것으로 예상된다. 따라서 하상변동 모의시에 유사량 공식뿐만 아니라 유사 이송형태 또한 반드시 고려해야 할 것이다.

## 4. 수치모형 선정 및 수치모의 조건

### 4.1 수치모형 선정

하상의 상승과 저하에 따른 하상변동에 대한 해석적인 연구방법이란 하천흐름 및 유사 이송을 지배하는 연속방정식, 운동방정식, 흐름저항 방정식, 유사연속방정식, 유사량 공식을 이용하여 수학적 방법에 의해 해법을 구하는 것이다. 주로 컴퓨터 발전에 힘입어 지배방정식과 수치해석기법을 이용한 수학적 모형들이 많이 이용되고 있다 (한국수자원공사, 2008). 이러한 수치모형들의 기본적인 원리는 하천흐름 및 유사 이송을 지배하는 방정식을 유한차분법, 유한요소법 등의 수치기법을 이용하여 해를 구하는 것으로 미국 공병단에서 1977년에 개발된 HEC-6모형이 1차원 하상변동 모의를 위한 대표적인 수치모형이며 그밖에 IALLUVIAL 모형, CHARIMA 모형, GSTARS 3.0 프로그램 등이 있다 (한국건설기술연구원, 1991).

2차원 하상변동 모형은 공학적 설계의 실행 가능성 평가나 최적화를 위한 계획과 의사결정, 단기간의 모의를 통한 장기간에 대한 영향예측 등 많은 분야에서 활용되고 있으며 특히, 일차원 해석에서 수행할 수 없는 복잡하고 불규칙한 경계와 하상을 가진 하도에 대한 유동분석을 위해서는 2차원 하상변동 모형을 통한 고찰이 효과적이다. 대표적인 2차원 수치모형으로는 SED2D 모형 (한국수자원공사, 2008)과 CCHE2D 모형 (Wu, 2001)이 있으며 본 연구에 적용할 수치모형을 선정하기 위해 두 모형의 특징을 Table 1과 같이 비교하였다. 두 모형의 가장 큰 차이점으로 SED2D 모형은 부유사 이송형태의 이류-확산 방정식과 Ackers and White (1973) 공식만을 적용하여 모의가 가능한 것에 비해 CCHE2D 모형은 하상토 입도분포의

입력이 가능하며 유사량 공식을 Ackers and White (1973) 공식, Engelund and Hansen (1967) 공식, Wu et al. (2000) 공식, SEDTRA Module (Garbrecht et al, 1995)들 중 하나로 선정하여 모의할 수 있다. 또한 유사 이송형태별 이류-확산 방정식의 경우는 소류사, 부유사, 총유사 이송형태로 모두 모의가 가능하다. 본 논문에서는 CCHE2D 모형을 이용하여 낙동강하구둑 상류 접근수로에 적합한 유사량 공식과 유사 이송형태별 이류-확산 방정식을 선정하기 위해 Ackers and White (1973)와 Engelund and Hansen (1967)의 유사량 공식과 소류사와 부유사 이송형태의 이류-확산 방정식을 각각 다르게 적용하여 하상변동 모의를 수행하였다.

### 4.2 수치모의 조건

본 연구에서는 대상하천에 적합한 유사량 공식과 유사 이송형태를 선정하기 위해 유량크기별 하상변동의 민감도 분석과 실제 수문사상을 적용한 하상변동 분석 두 가지 형태로 수행하였다. 수치모형의 매개변수 및 격자 크기에 따른 검보정은 한국수자원공사 (2008)에 의해 RMA2 모형을 이용하여 수행되었으며 본 연구에서 사용된 CCHE2D 모형의 검보정 또한 한국수자원공사 (2008)의 결과를 활용하였다.

#### 4.2.1 유량크기별 민감도 분석 모의 조건

유량크기별 하상변동 민감도 분석을 위해 2002년 5월 1일부터 9월 30일까지의 하구둑 지점 일평균 수위자료와 일평균 유량자료를 이용하였으며 낙동강 홍수통제소 홈페이지 (<http://www.nakdongriver.go.kr>)를 통해 자료를 수집하였다. 2002년 5월 1일부터 9월 30일까지 수집된 수문자료는 삼랑진 지점에서 유량이 2,000 m<sup>3</sup>/s 미만인 경우 (평균유량, 652 m<sup>3</sup>/s), 2,000 m<sup>3</sup>/s 이상 8,000 m<sup>3</sup>/s 이하인 경우 (평균유량, 4,623 m<sup>3</sup>/s), 8,000 m<sup>3</sup>/s 초과인 경우 (평균유량, 9,152 m<sup>3</sup>/s)로 분류하였으며 분류된 군 별로 발생 유량의 평균값이 산정되었고 분류된 유량 군에 따른 하구둑 지점의 수위 평균값을 하류단 경계조건으로 활용하였다. 유량-유사량 관계식은 한국수자원공사 (1995)에 의해 조

Table 1. Comparison of Numerical Models for Bed Change Calculation

Model	Characteristics	Sediment capacity formula
SED2D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Finite element method</li> <li>2-Dimensional</li> <li>Suspended load type</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ackers and White (1973)</li> </ul>
CCHE2D	<ul style="list-style-type: none"> <li>Finite element method</li> <li>2-Dimensional</li> <li>Suspended, bed, and total load types</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ackers and White (1973)</li> <li>Engelund and Hansen (1967)</li> <li>Wu et al. (2000)</li> <li>SEDTRA Module (Garbrecht et al, 1995)</li> </ul>

사된 진동지점의 유사량 자료를 이용한 관계식을 활용하였으며 그 형태는 다음과 같다.

$$Q_s = 0.224987Q^{1.71556} \quad (5)$$

여기서,  $Q_s$  (tons/day)는 유사량을 표시하며  $Q$  ( $m^3/s$ )는 유량을 나타낸다. 각 군별 수문조건 발생 일수와 진동 지점에서의 유량-유사량 관계식에 의해 계산된 유사량 및 초기 유사량 값을 각각 산정하였으며 하상토 입경은 대표 입경인 0.25 mm, 조도계수는 0.023 (한국수자원공사, 2008)을 적용하였다. 대상영역의 하폭은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 위치에 따라 다르며 좌안 수로 부분 하류단인 수문구간의 폭이 약 500 m 정도 된다. 또한 대상 영역의 하상경사는 0.0001에서 0.0002로 매우 완만한 경사를 형성하고 있다. Ackers and White (1973)와 Englund and

Hansen (1967)의 유사량 공식과 소류사와 부유사 이송형태를 각각 고려하여 Table 2와 같은 수치모의 조건으로 나누어 하상변동 모의를 수행하였다.

#### 4.2.2 실제 수문사상을 적용한 하상변동 모의 조건

낙동강하구둑 상류 접근수로를 대상으로 실제 수문사상에 의한 하상변동 모의에 사용된 유량 및 수위조건은 Fig. 4와 같다. 2002년 7월 24일부터 11월 4일까지의 일평균 유량 및 수위자료이며 이는 삼랑진 지점의 유량과 하구둑에서의 수위자료이다. 앞서 대상하천의 개요에서도 설명했듯이 낙동강하구둑 상류 접근수로에서는 하구둑 건설로 인한 퇴사를 제거하기 위해 매년 준설이 수행되어지고 있으며 2002년의 준설이 수행된 구간은 낙동강하구둑

Table 2. Modeling Conditions for the Sensitive Analysis

CASE	Sediment transport modes	Sediment transport capacity formula	Upstream discharge ( $m^3/s$ )	Downstream water surface level (EL.m)	Simulation time (Day)	Sediment discharge ( $kg/m^3$ )
CASE 1	Suspended load type	Ackers and White (1973)	652	0.74	131	0.2688
CASE 2			4,623	0.83	16	1.0917
CASE 3			9,152	1.11	6	1.780
CASE 4		Englund and Hansen (1967)	652	0.74	131	0.2688
CASE 5			4,623	0.83	16	1.0917
CASE 6			9,152	1.11	6	1.780
CASE 7	Bed load type	Ackers and White (1973)	652	0.74	131	0.2688
CASE 8			4,623	0.83	16	1.0917
CASE 9			9,152	1.11	6	1.780
CASE 10		Englund and Hansen (1967)	652	0.74	131	0.2688
CASE 11			4,623	0.83	16	1.0917
CASE 12			9,152	1.11	6	1.780

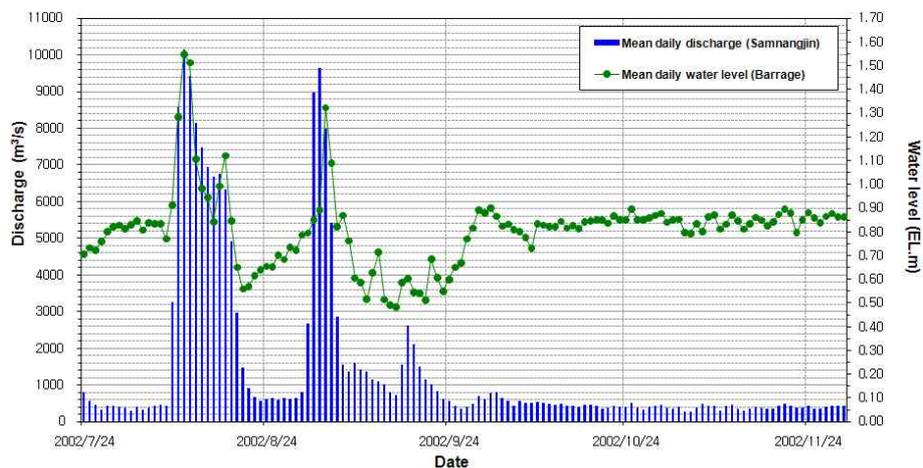


Fig. 4. Discharge and Water Level Data at the Lower Nakdong River in 2002

기준으로 상류 1km에서 1.5km 사이 구간과 2km에서 2.5km 사이 구간이다. 그리고 준설은 횡단면에서 준설기준이 되는 높이 위로 쌓인 퇴사를 대상으로 하고 있다. 2002년 7월 24일에 측량이 실시된 직후 준설이 시행되었고 홍수기 이후인 11월 4일에 재측량되었다. 따라서 수치모의시에도 2002년 7월 24일에 측량된 지형자료를 준설이 된 후의 지형으로 수정한 후 이를 초기지형자료로 활용하였다.

## 5. 수치모의결과 및 분석

### 5.1 유량 크기별 민감도 분석 결과

#### 5.1.1 유사량 공식에 따른 하상변동 모의결과

유사량 공식을 다르게 적용한 유량 크기별 민감도 분석 결과, 유사 이송형태가 부유사 이송형태이고  $652 \text{ m}^3/\text{s}$  유량 조건에서 유사량 공식을 Ackers and White (1973)와 Engelund and Hansen (1967) 공식으로 각각 적용하였을 경우, 유입유사량으로 인해 상류부 퇴적만 발생할 뿐 하상변동이 발생하지 않았다 (Fig. 5). 상류부의 퇴적 또한 자연적인 현상에 의한 것이 아닌 상류단 경계조건으로 인해 발생한 것 (boundary effect)이다.  $4,623 \text{ m}^3/\text{s}$  유량 조건을 적용한 결과, Ackers and White (1973) 공식을 적용한 하상변동 모의결과는 대상하천 전반에 걸쳐 침식과 퇴적이 발생 (최대  $0.78 \text{ m}$ 의 퇴적이 발생하였고 최대  $0.58 \text{ m}$ 의 침식이 발생)하였지만 (Fig. 6 (a)) Engelund and Hansen (1967) 공식을 적용한 모의결과는  $652 \text{ m}^3/\text{s}$  유량에서와 같이  $4,623 \text{ m}^3/\text{s}$  유량에서도 하상변동이 발생하지 않았으며  $652 \text{ m}^3/\text{s}$  유량으로 모의한 결과와 비슷한

양상으로 상류부 퇴적만 발생할 뿐 하상변동은 발생하지 않았다. 이 또한 자연적인 현상에 의한 것이 아닌 상류단 경계조건으로 인해 발생한 것 (boundary effect)으로 판단된다. 경계에서의 유입유사로 인해 유입부에서 최대  $0.775 \text{ m}$ 의 퇴적만 발생했을 뿐 주수로 하상변동이 발생하지 않았다 (Fig. 6 (b)).  $9,152 \text{ m}^3/\text{s}$  유량에서 Ackers and White (1973)와 Engelund and Hansen (1967) 공식을 각각 적용하여 하상변동한 모의결과는 Fig. 7과 같으며 Ackers and White (1973) 공식을 적용한 하상변동 모의 결과에서는 대상하천에서 전반적인 침식과 퇴적의 하상변동이 발생하였지만 Engelund and Hansen (1967) 공식을 적용한 모의결과에서는 Fig. 7 (b)와 같이 하상변동이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한 정량적인 비교에서는 Ackers and White (1973) 공식의 경우 퇴적이 최대  $0.37 \text{ m}$ , 침식은  $0.23 \text{ m}$  발생하였고 (Fig. 7 (a)) Engelund and Hansen (1967) 공식의 경우 유입유사로 인해 최대  $0.31 \text{ m}$ 의 퇴적만 발생한 것으로 나타났다 (Fig. 7 (b)).

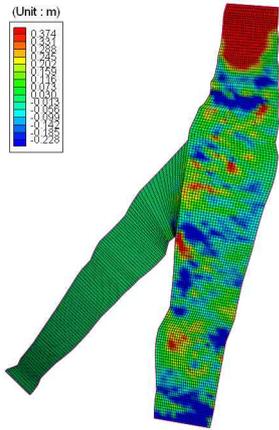
다음으로 유사 이송형태를 소류사 이송형태로 적용하고 동일한 경계조건으로 하상변동 모의를 수행한 결과를 각 유량등급별로 Figs. 8, 9, 10과 같이 나타냈으며 정량적 차이는 있지만 하상변동 양상은 부유사 이송형태를 적용한 모의결과의 양상과 유사하게 나타났다. 두 가지 유사 이송형태 모두 Engelund and Hansen (1967) 공식을 적용한 하상변동 모의결과보다 Ackers and White (1973) 공식을 적용한 하상변동 모의결과에서 세 가지 유량크기에 대해 침식과 퇴적의 하상변동이 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 결과를 종합해보면 대상하천에서는 Ackers and White (1973) 공식이 2차원 수치모의시 Engelund and Hansen (1967) 공식보다 더 적합한 것으로 판단된다.



(a) Ackers and White (1973) Formula

(b) Engelund and Hansen (1967) Formula

Fig. 5. Simulation Results of  $Q=652 \text{ m}^3/\text{s}$  and Suspended Load Type

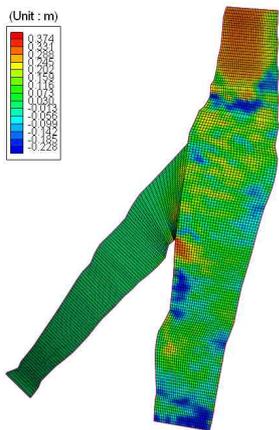


(a) Ackers and White (1973) Formula

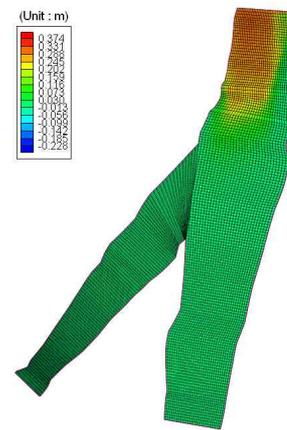


(b) Engelund and Hansen (1967) Formula

**Fig. 6. Simulation Results of  $Q=4,623 \text{ m}^3/\text{s}$  and Suspended Load Type**



(a) Ackers and White (1973) Formula



(b) Engelund and Hansen (1967) Formula

**Fig. 7. Simulation Results of  $Q=9,152 \text{ m}^3/\text{s}$  and Suspended Load Type**

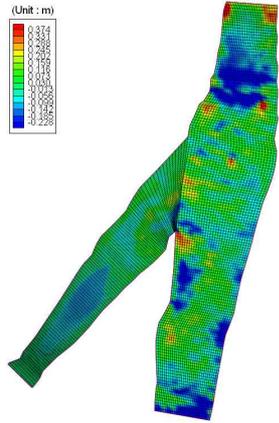


(a) Ackers and White (1973) Formula



(b) Engelund and Hansen (1967) Formula

**Fig. 8. Simulation Results of  $Q=652 \text{ m}^3/\text{s}$  and Bed Load Type**

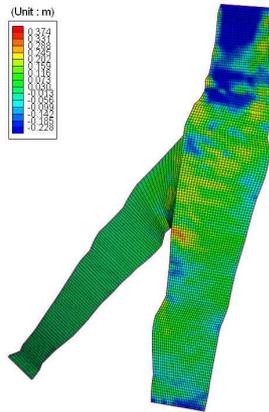


(a) Ackers and White (1973) Formula



(b) Engelund and Hansen (1967) Formula

Fig. 9. Simulation Results of  $Q=4,623 \text{ m}^3/\text{s}$  and Bed Load Type



(a) Ackers and White (1973) Formula



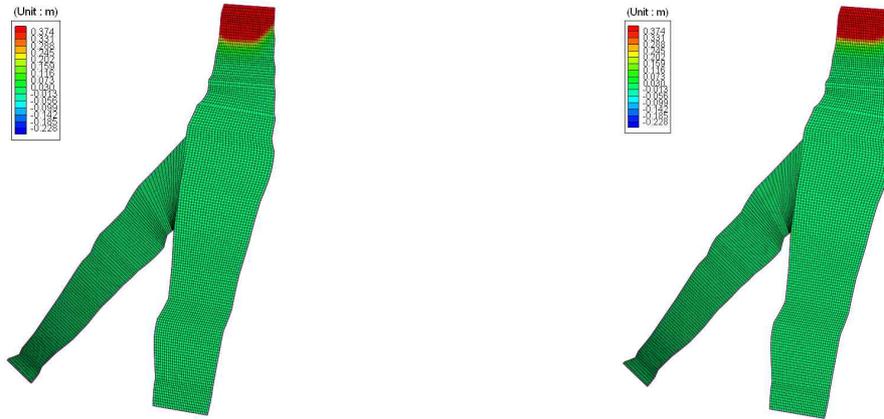
(b) Engelund and Hansen (1967) Formula

Fig. 10. Simulation Results of  $Q=9,152 \text{ m}^3/\text{s}$  and Bed Load Type

### 5.1.2 유사 이송형태에 따른 하상변동 모의결과

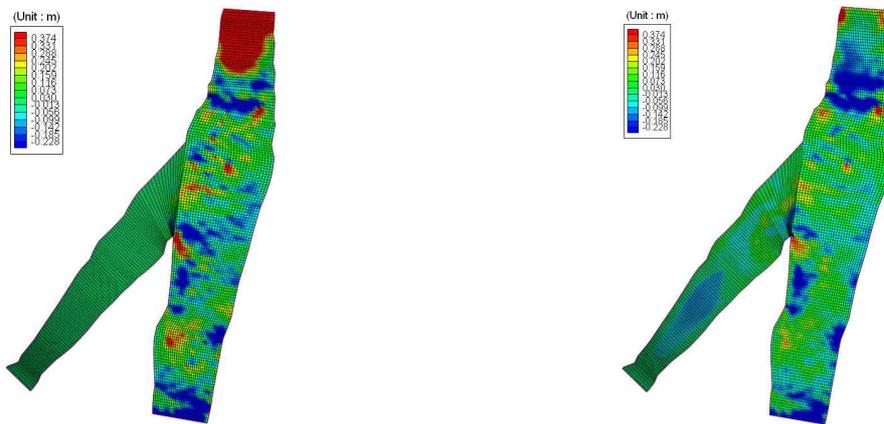
부유사 및 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 각각 다르게 적용한 모의에서는 Ackers and White (1973) 공식을 공통적인 유사량 공식으로 선정하여 모의를 수행하였다.  $652 \text{ m}^3/\text{s}$  유량을 적용한 하상변동 모의결과는 Fig. 11과 같고 부유사와 소류사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과 모두에서 유입유사량으로 인해 상류부에서의 퇴적만 발생하였을 뿐 대상하천에서 전반적인 하상변동은 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이러한 모의결과는 적은 유량으로 인해 침식이나 퇴적의 하상변동이 어떠

한 유사 이송형태에서든 발생하지 않다는 것을 증명하고 있다.  $4,623 \text{ m}^3/\text{s}$  유량조건에서는 부유사와 소류사 이송형태를 적용한 하상변동 모의에서 침식과 퇴적의 하상변동이 발생하였다 (Fig. 12).  $9,152 \text{ m}^3/\text{s}$  유량을 적용한 하상변동 모의결과, 부유사 이송형태의 모의결과에서는 유입유사로 인해 상류경계에 퇴적되는 유사 많았으며 부유사 이동으로 인해 하류에서도 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 소류사 이송형태에서는 상류에서 침식현상이 두드러지게 나타났으며 하류로 갈수록 정량적 크기는 다르지만 부유사 이송형태와 유사한 하상변동 양상이 나타났다.



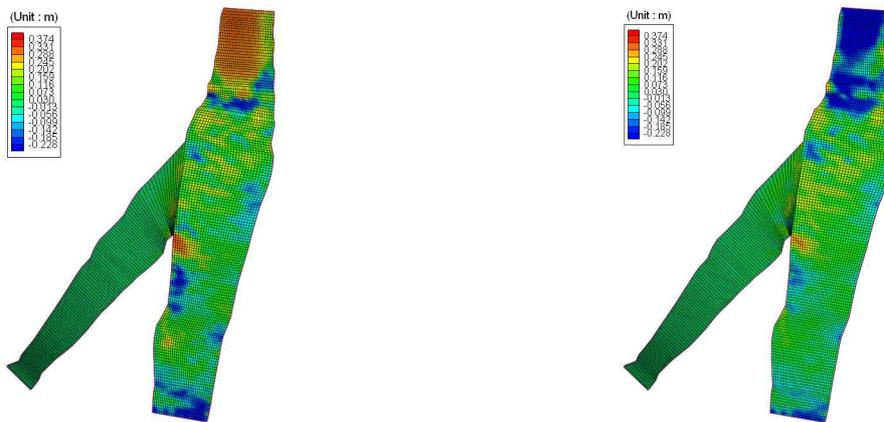
(a) Suspended Load Type with Ackers and White (1973) Formula      (b) Bed Load Type with Ackers and White (1973) Formula

**Fig. 11. Bed Change Results Due to Different Sediment Transport Modes ( $Q=652 \text{ m}^3/\text{s}$ )**



(a) Suspended Load Type with Ackers and White (1973) Formula      (b) Bed Load Type with Ackers and White (1973) Formula

**Fig. 12. Bed Change Results Due to Different Sediment Transport Modes ( $Q=4,623 \text{ m}^3/\text{s}$ )**



(a) Suspended Load Type with Ackers and White (1973) Formula      (b) Bed Load Type with Ackers and White (1973) Formula

**Fig. 13. Bed Change Results Due to Different Sediment Transport Modes ( $Q=9,152 \text{ m}^3/\text{s}$ )**

## 5.2 실제 수문사상을 적용한 하상변동 모의결과

대상하천에 대해 유사량 공식에 의한 유사량 값과 현장 관측을 통해 분석된 유사량 값을 상호 비교한 내용 (Fig. 2)과 유사량 공식에 따른 하상변동 모의결과 분석을 통해 본 연구에서 1차적으로 제시된 내용 (5.1장)을 바탕으로 제시된 최적의 유사량 공식인 Ackers and White (1973) 공식의 적용성을 검증하기 위해 2002년의 실제 수문사상을 적용한 하상변동 모의를 수행하였다. 모의결과는 Figs. 14 (a) and (b)이며 부유사 및 소류사 이송형태에서 모두 침식과 퇴적의 하상변동이 나타났으며 이와 비교할 실제 측정된 하상 변동고는 Fig. 14 (c)와 같다.

부유사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용한 하상변동 모의결과 (Fig. 14 (a))에서는 하류에서 퇴적되는 양상이 크게 나타났으며 소류사 이송형태를 적용한 모의결과 (Fig. 14 (b))에서는 상류와 하류에서 침식이 더 크게 나타나는 양상을 보였다.

실제 수문사상을 적용한 하상변동 모의결과 중 준설구간 외 지형의 횡단면을 실제 측량된 횡단면 (Fig. 15)과 비교하였다. 소류사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과가 부유사 이송형태를 적용했을 경우보다 11월 측량한 횡

단면과 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 부유사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과는 침식이 적게 나타나거나 횡단면 중앙에서 퇴적이 발생하는 등 하상변동의 양상이 실제 현상과 다르게 나타났다.

각 횡단면에서 7월 하상 대비 하상변동 크기 차이를 Table 3과 같이 나타내었다. 침식과 퇴적의 최대값을 비교하였으며 실제 측량한 지형에서의 하상변동 크기가 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용한 하상변동 크기와 유사한 것으로 나타났으며 그 차이는 최소 0.09 m에서 최대 0.84 m이었다. 이는 부유사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과 (최소 0.17 m에서 최대 1.20 m)에서 발생한 하상변동 크기보다 적은 것으로 나타났다.

준설구간 내 횡단면 (Fig. 16)에서도 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용한 하상변동 모의결과가 실제 측량된 횡단면과 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 준설을 고려한 하상변동 모의결과 중 준설구간에서 발생한 하상변동의 정량적인 크기를 실제 지형에서 발생한 하상변동과 비교하였다 (Table 4). 실제 측량한 지형에서의 하상변동 크기가 소류사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과와 정량적으로 비슷하였으며 부유사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과와는 차이가 큰 것으로 나타났

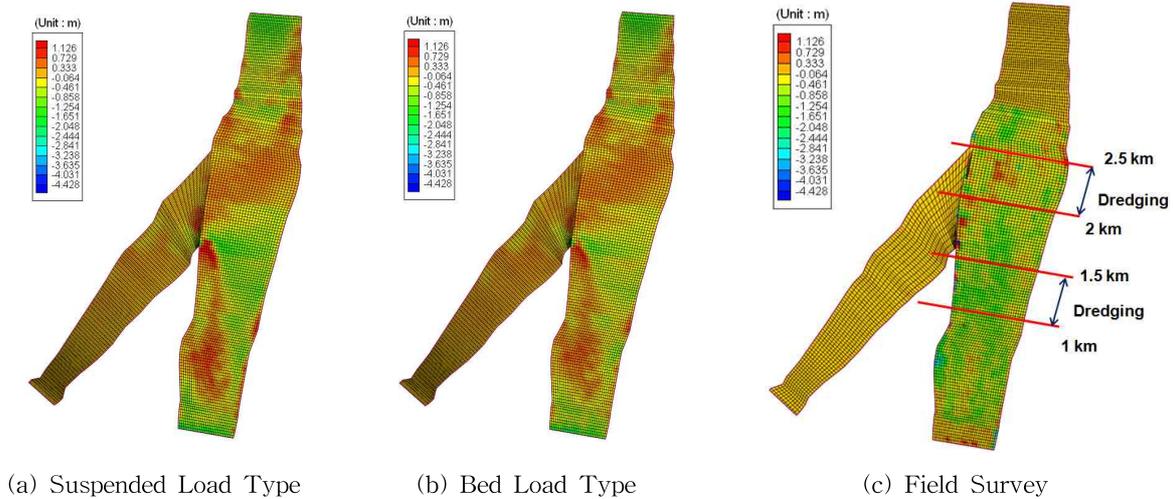


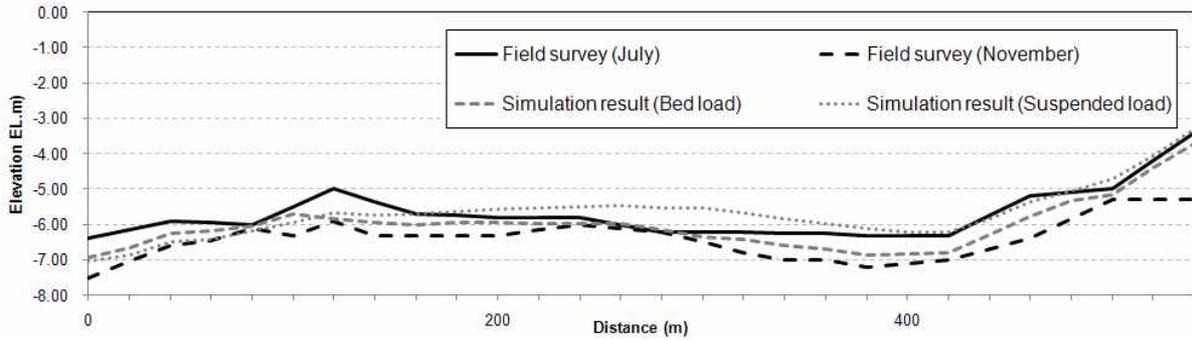
Fig. 14. Comparison of the Bed Changes Simulated in the Model and Measured in the Field

Table 3. Maximum Deposit and Erosion Heights

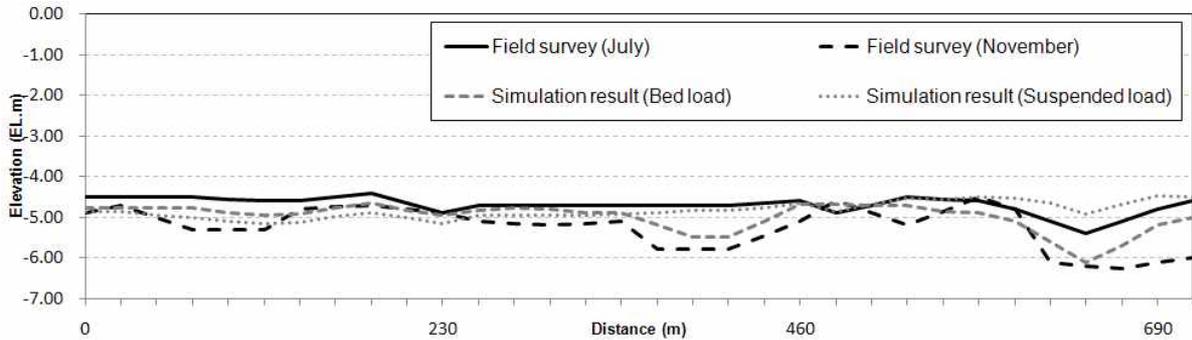
Distance from the Nakdong River Estuary Barrage	Field survey (November, 2002)	Simulation result (Bed load)	Simulation result (Suspended load)
800 m	-1.90 m	-0.84 m	-0.70 m
1,950 m	+0.30 m -1.10 m	+0.21 m -0.80 m	+0.47 m -0.56 m

다. 예를 들어 하구둑으로부터 1,450 m 떨어진 지점의 경우, 실제 측정한 하상변동과 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식이 적용된 모의결과가 각각 최대 퇴적 0.21 m,

0.20 m인 것으로 나타났으며 두 값의 차이가 1 cm에 불과했다. 또한 1,250 m 지점에서도 실제 하상변동과 소류사 이송형태 모의결과와의 차이가 5 cm인 것으로 나타났다.

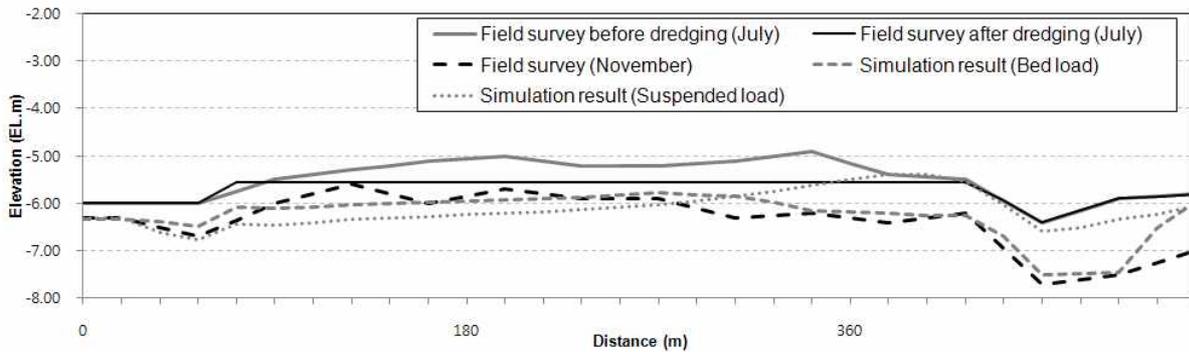


(a) Comparison of Cross Sections in 800 m Upstream of NREB

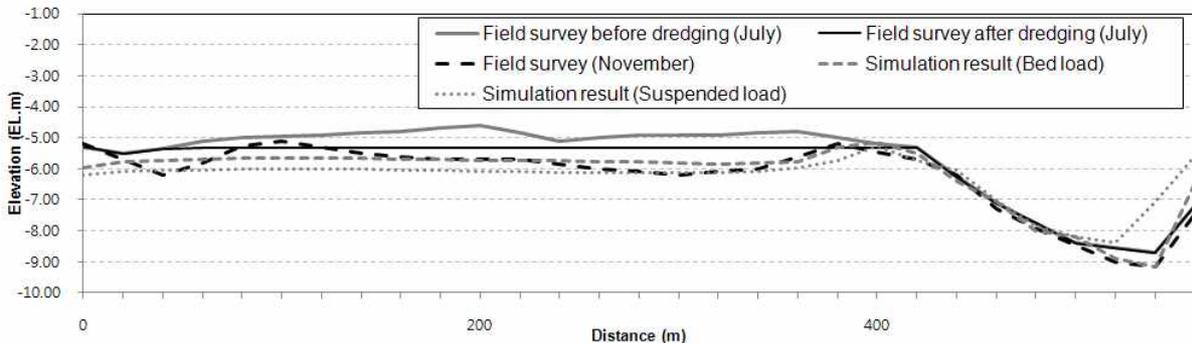


(b) Comparison of Cross Sections in 1,950 m Upstream of NREB

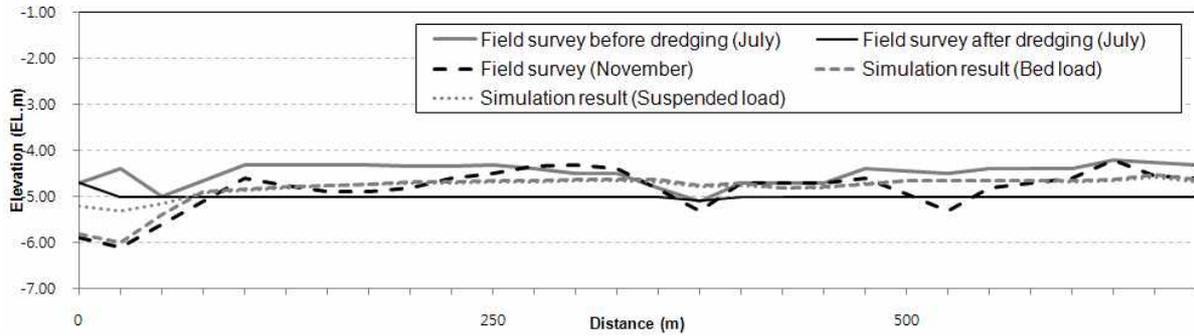
Fig. 15. Measured and Simulated Results of Bed Change



(a) Comparison of Cross Sections in 1,250 m Upstream of NREB



(b) Comparison of Cross Sections in 1,450 m Upstream of NREB



(c) Comparison of Cross Sections in 2,250 m Upstream of NREB

Fig. 16. Measured and Simulated Results of Bed Change (Dredging section)

Table 4. Maximum Deposit and Erosion Heights with Dredging (Dredging section)

Distance from the Nakdong River Estuary Barrage	Field survey (November, 2002)	Simulation result (Bed load)	Simulation result (Suspended load)
1,250 m	-1.60 m	-1.55 m	-0.91 m
1,450 m	+0.21 m -0.89 m	+0.20 m -0.53 m	+0.21 m -0.82 m
2,250 m	-1.40 m	-1.10 m	-0.50 m

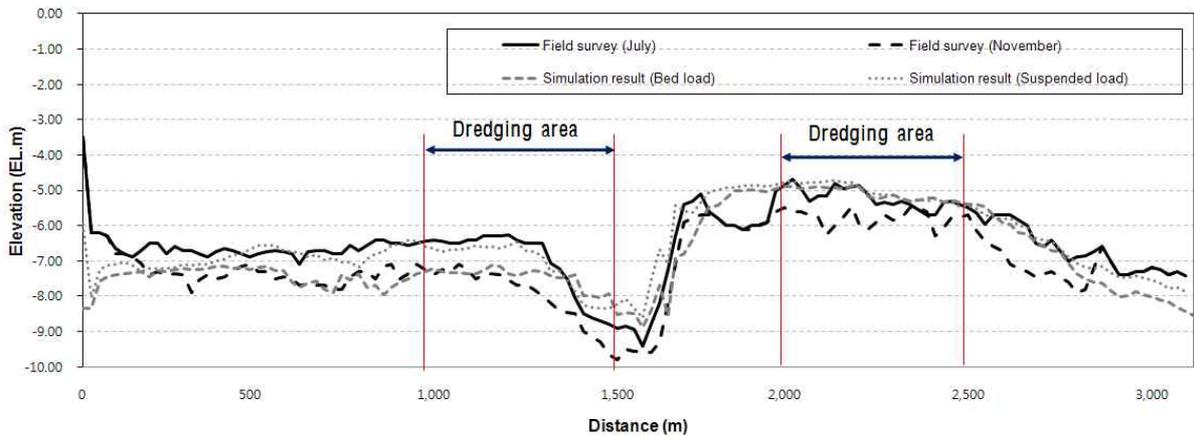


Fig. 17. Comparison of the Measured Result in 2002 and the Simulated Thalweg Lines

대상하천 전 구간의 최심하상고 모의결과를 Fig. 17과 같이 실제 측량된 최심하상고와 비교하였다. 최심하상고의 비교에서도 횡단면 비교에서와 마찬가지로 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용한 하상변동 모의결과가 실제 최심하상고와 준설구간과 준설구간이 아닌 구간 모두에서 대체적으로 일치하는 것으로 나타났다. 부유사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과는 소류사 이송형태를 적용한 하상변동 모의결과보다 비교적 침식이 적게 발생하는 양상을 나타내었으며 상류에서는 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다.

## 6. 결 론

본 논문은 낙동강하구둑 상류 접근수로에서의 하상변동 수치모의를 위한 최적의 유사량 공식 및 유사 이송형태별 이류-확산 방정식의 선정을 위해 CCHE2D 모형을 이용하여 유량크기별 하상변동 민감도 분석과 실제 수문사상을 적용한 하상변동 모의를 수행하였으며 그 결론은 다음과 같다.

유사량 공식을 Ackers and White (1973) 공식과 Engelund and Hansen (1967) 공식으로 적용한 결과, Engelund and Hansen (1967) 공식의 경우,  $652 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $4,623 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $9,152$

m<sup>3</sup>/s의 유량조건 모두에서 상류부 경계에서 유입유사량으로 인한 퇴적현상만 발생한 반면, Ackers and White (1973) 공식을 적용한 조건에서는 652 m<sup>3</sup>/s 조건의 적용시에만 상류부 퇴적의 하상변동이 발생하였고 4,623 m<sup>3</sup>/s와 9,152 m<sup>3</sup>/s 조건에서는 침식과 퇴적의 하상변동 양상이 전 구간에서 발생하였다. 또한, 유사 이송형태를 소류사와 부유사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용한 하상변동 모의결과에서는 652 m<sup>3</sup>/s 조건을 제외한 나머지 두 가지 유량조건 (4,623 m<sup>3</sup>/s와 9,152 m<sup>3</sup>/s)에서 하천 전 구간에서 침식과 퇴적의 하상변동 양상이 나타났다.

2002년 실제 수문사상을 적용한 모의결과에서는 실제 측량한 하상의 횡단면과 비교한 결과, 준설구간이 아닌 곳에 위치한 단면의 경우, 부유사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용했을 때 최소 0.17m에서 최대 1.20m의 하상변동 차이를 보인 반면, 실제 측량한 지형과 소류사 이송형태를 적용한 모의결과와의 비교에서는 최소 0.09m에서 최대 0.84m의 차이를 나타냈다. 준설구간 내에 위치한 횡단면의 경우도 부유사 이송형태를 적용한 모의결과는 실제 지형에서의 하상변동 크기와 최소 0.07m에서 최대 0.90m의 차이가 나타났으며 소류사 이송형태를 적용한 모의결과는 최소 0.01m에서 최대 0.30m의 하상변동 크기 차이를 보이는 것으로 나타났다.

따라서 낙동강하구둑 상류 접근수로의 하상변동 양상을 2차원 수치모형을 이용하여 분석할 경우, 진동 지점에서 유사량을 과다하게 산정하는 것으로 평가된 Engelund and Hansen (1967) 공식보다는 측정된 유사량 값과 비교적 일치하는 것으로 나타난 Ackers and White (1973) 공식을 적용한 하상변동 모의가 실제 하상변동과 유사한 것으로 나타났다. 유사 이송형태는 부유사 이송형태보다 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용했을 경우가 하상변동 수치모의시 실제 현상에 더 근접한 것으로 나타났다. 이는 낙동강하구둑 접근수로에서는 홍수시에는 유사 이송형태가 부유사 이송 형식이 지배적인 반면 평수시 또는 홍수 발생 초기에는 소류사 이송방식이 더 지배적인 것을 알 수 있다. 하지만 수치모의시에는 평수 및 홍수 조건이 모두 포함되어 있는 실제 수문사상이 적용되었기 때문에 대상하천의 경우는 평수와 홍수 조건에서의 수치모의가 구분되어 수행될 경우 홍수시에는 부유사 이송형태를 평수시에는 소류사 이송형태의 이류-확산 방정식을 적용하는 것이 바람직 할 것이다.

## 참 고 문 헌

이길성, 이남주 (1992), "유사량 산정 공식의 비교 연구." 대한토목학회 정기학술발표대회.

- 한국건설기술연구원 (1989). 하천 유사량 산정방법의 선정 기준 개발, 기본연구과제 보고서, 건기연 89-WR-112.
- 한국건설기술연구원 (1991). 하상변동 예측모형의 비교 분석, 건기연 91-WR-112.
- 한국수자원공사 (1995). 낙동강하구둑 퇴사 거동 특성에 관한 연구.
- 한국수자원공사 (2008). 낙동강하구둑 유지관리 개선방안 연구보고서.
- Ackers, P., and White, W.R. (1973). "Sediment transport New approach and analysis." *Journal of Hydraulic Div*, ASCE, Vol. 99, No. HY11, pp. 2041-2060
- ASCE (1982). ASCE Task committee on Relations between Morphology of Small Streams and Sediment Yields of the Committee on Sedimentation of the Hydraulics Division: "Relationships Between Morphology of Small Streams and Sediment Yields." *Journal of Hydraulics Div*, ASCE, Vol. 108, No. HY 11, Proceeding Paper 17 450, pp. 1328-1365.
- Bagnold, R.A. (1966). "An Approach to the Sediment Transport Problem from General Physics." USGS Professional Paper 422-J, Washington, D.C.
- Brooks, N.H. (1963). "Calculation of Suspended Load Discharge from Velocity, and Concentration Parameters." *Proceedings of the Federal Interagency Sedimentation Conference*, Miscellaneous Publication No. 970, Agricultural Research Service, USDA, Washington, D.C.
- Brown, C.B. (1950). "Sediment Transportation." *Engineering Hydraulics*, ed. H. Rouse, John Wiley, New York.
- Brownlie, W.R. (1981). *Prediction of flow depth and sediment discharge in open-channels*. Report no. KH-R-43A. Pasadena, California Institute of Technology, W.M. Keck Laboratory.
- Colby, B.R., and Hembree, C.H. (1955). "Computations of Total Sediment Discharge Niobrara River Near Cody." Nebraska, water Supply Paper 1357, U.S. Geological Survey, Washington, D.C.
- DuBoys, M.P. (1879). "Le Rhône et les Rivières à lit affouillable." *Annales de Ponts et Chaussées*, SEC, Vol. 18, No. 5, pp. 141-195.
- Einstein, H.A. (1942), "Formula for the Transportation of Bed-Load." *Transactions of the ASCE*, Vol. 107, pp. 561-573.
- Engelund, F., and Hansen, E. (1967). A Monograph on

- Sediment Transport to Alluvial Streams. Copenhagen, Teknik Vorlag.
- 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
- Huang, S.L. (2007). "Effect of Using Different Sediment Transport Formulae and Methods of Computing Manning's Roughness Coefficient on Numerical Modeling of Sediment Transport." *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No. 3, pp. 347-356.
- ISWACO-NEDECO (1987). Nakong River Estuary Barrage and Reclamation Project: Operation Manual. Republic of Korea Industrial Sites and Water Resources Development Corporation and Netherlands Engineering Consultants, Busan, Korea.
- Ji, U. (2006). *Numerical Model for Sediment Flushing at the Nakdong River Estuary Barrage*. Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
- Kalinske, A.A. (1947). "Movement of Sediment as Bed Load in Rivers." *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 28, No. 4, Washington, D.C.
- Lane, E.W., and Kalinske, A.A. (1941). "Engineering Calculations of Suspended sediment." *Transactions of the American Geophysical Union*, Vol. 20, No. 3, pp. 603-607.
- Meyer-Peter, E., Favre, H., and Einstein, A. (1934). "Neuere Versuchsergebnisse über den Geschiebetrieb." *Schweiz Bauzeitung*, Vol. 103, No. 13.
- Meyer-Peter, E., and Müller, R. (1948). "Formula for bed-load transport." *Proceedings of International Association for Hydraulic Research, 2nd Meeting, Stockholm*.
- Nakato, T. (1990). "Test of Selected Sediment Transport Formulas." *Journal of Hydraulic Eng.*, ASCE, Vol. 116, No. 3, pp. 362-379.
- Schoklitsch, A. (1934). *Handbuch des Wasserbaues*, Springer, Vienna, 2nd ed., English Translation by S. Shulits.
- Shen, H.W., and Hung, C.S. (1972). An Engineering approach to total bed-material load by regression analysis. Proceeding Sedimentation Symposium, ed. H.W. Shen Berkeley, Calif: Water Resources pub. Chap 14. Remodified Einstein Procedure for sediment load. *Journal of Hydraulic Div.*, ASCE, 109, No. 4,
- Shields, A. (1936). "Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und Turbulenz forschung auf die Geschiebebewegung." *Mitteil. Preuss. Versuchsanst. Wasser, Erd, Schiffsbau, Berlin*, No. 26.
- Toffaletti, F.B. (1969). "Definitive computations of sand discharge in rivers." *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, Vol. 95 (HY1), pp. 225-246.
- White, W.R., Milli, H., and Crabbe, A.D. (1973). "Hydraulics Research Station, Report no, IT 119, Wallingford, U.K." *Sediment Transport: An Appraisal Method*, Vol. 2, Performance of Theoretical Methods, When Applied to Flume and Field Data.
- Wu, W. (2001). "CCHE2D Sediment Transport Model (Version 2.1)." National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, MS, USA.
- Wu, W. (2002). "Computational River Dynamics." National Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi, MS, USA.
- 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.
- Yang, C.T. (1973). "Incipient motion and sediment transport." *Journal of Hydraulic Div.*, ASCE, Vol. 99, No. HY10: pp. 1679-1704.
- Zeng, J., Constantinescu, G., and Weber, L. (2006). "Prediction of Equilibrium Flow and Bed Load Transport in a Curved Bend." *World Environmental and Water Resources Congress*, ASCE, pp. 1-11.

논문번호: 10-014	접수: 2010.02.04
수정일자: 2010.04.15/04.28	심사완료: 2010.04.28