

## 소규모 하구에서 토사유출 확산제어에 관한 연구

### A Study on Controlling Efflux Sediment Diffusion by Jetty Construction at Small Estuary

박상길\* · 박현수\*\* · 윤종수\*\*\* · 이시호\*\*\*\*

Park, Sang Kil · Park, Hyun Su · Yoon, Jong Su · Lee, Si Ho

#### Abstract

In this study, a jetty construction is taken into account for the reduction of sediment diffusive concentration incoming from the upstream river due to the urbanization and industrial development and to minimize the effects on the coastal ecosystems. The field observation and numerical calculation are conducted to analyze the diffusion zone of sediment concentration in the small estuary and coastal area. The specification of the installed jetty which is able to control the sediment concentration was decided based on the prediction of the dispersion area changes in space and time. The selected size and layout for the jetty design were examined for the dispersion zone by numerical calculation and field observation. As a result, the jetties constructed in the estuary retarded the dispersion rate of sediment concentration, so that the effect area of sediment dispersion was obviously decreased. In addition, the measured field data indicated that the sediment deposition in the inside of dikes could be controlled and the right side area of jetties could be preserved without influx sediment diffusion.

**Keywords** : prediction of sediment diffusion, concentration of sediment, small estuary, jetties, distribution of field sediment concentration

#### 요 지

본 논문은 상류지역의 개발로 인해 발생하는 토사가 우수 시에 하천을 통하여 하구로 유입되면서 유입토사의 확산이 발생하여 하구의 우안에 서식하는 해안의 생태계에 영향을 미치고 있기 때문에 이를 최소화하기 위해 토사확산을 제어할 수 있는 도류제를 설치하고자 하였다. 토사확산의 영역을 수치계산과 현장실측으로 검증한 것이다. 도류제의 설치유무에 따라 확산영역의 변화와 토사의 농도를 검토하였다. 모델하구에 도류제를 설치할 경우는 유입파랑을 차단하므로 인해 홍수량의 유출이 원만하게 발생되어 수심이 깊은 곳 까지 유속이 발생되어 수심이 얇은 지역에 대해서 확산범위도 감소되었고 동시에 이 지역에 대해 토사확산 농도가 감소되었다. 이는 도류제 시공후의 현장관측에 의해서도 도류제 내부의 유입토사의 제어에 의해 우안 도류제의 외곽부분은 토사농도가 감소되고 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 토사확산예측, 토사농도, 소규모 하구, 도류제, 현장농도 분포

#### 1. 서 론

최근에 해안생태계의 보전을 위해 각 지자체에서 다방면으로 노력을 기울이고 있다. 이러한 노력은 환경보전을 목적으로 개발에 대한 부작용을 최소화하기 위한 것이다. 현재까지는 이러한 노력이 환경관련 연구자와 수자원 관련 연구자를 중심으로 집중적으로 연구가 진행되고 있다. 이들 연구가 진행되는 지역의 하천이나 호소 등은 조석과 파랑이 없는 곳으로 기존의 수질모델을 이용하여 충분한 결과를 도출할 수 있다. 그러나 조석과 파랑이 공존하는 하구나 하구인접 해안에서 기존의 수질모델로서 수리현상을 재현하여 예측하는 것

이 타당한지에 대한 연구검토는 아직 진행되고 있지 않고 있는 실정이다. 하구는 홍수량과 파랑의 규모에 따라 수리현상이 변화하기 때문에 해안공학과 하천공학 분야에서 단독으로 접근하는 것 보다 공동으로 병행하여 연구하는 것이 정확한 현상을 규명할 수 있다고 생각된다.

본 연구가 진행되었던 곳은 바다와 접해있는 소규모 하구로서 하천상류에 택지를 개발하면서 강우 시에 수산양식을 하고 있는 해안에 홍수량과 함께 유입되어 토사가 해안선을 따라 확산됨에 따라 양식장에 약간의 좋지 않는 영향을 미치고 있는 곳이다. 즉, 연구모델의 하구는 집중호우 시에 토사가 해안으로 확산되어 해안 생태계에 영향을 주어 생산량

\*정회원 · 교신저자 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 교수 (E-mail : sakpark@pusan.ac.kr)

\*\*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 대학원 박사과정 (E-mail : phs@bmc.busan.kr)

\*\*\*국립환경과학원 낙동강물환경연구소 유역환경연구과 (E-mail : yoon4318@hotmail.com)

\*\*\*\*정회원 · 부산대학교 사회환경시스템공학부 토목공학과 대학원 석사과정 (E-mail : dinkhamjjang@naver.com)

이 감소하고 있는 실정이므로 유출토사의 확산영역을 저감시킬 수 있는 구조물 설치방안이 요구되고 있었다. Park 등(2008)은 이를 위해 수치계산으로 토사확산 영역을 예측한 후 수리실험을 통해 확산현상을 재현시키고 현지관측을 통해 구조물 설치의 타당성을 검증하기 위해 현장관측을 실시하였다. 여기서 소규모 하구는 지방2급 하천이 바다와 접한 영역으로 평상시는 파랑에 의해 수리현상이 발생되고 호우시는 유출홍수량에 따라 수리현상이 발생하는 규모가 작은 하구로 정의한다. 박상길 등(2008)은 이곳을 대상으로 평상시에 파랑에 의해 퇴적된 사주가 홍수 시에 해안으로 유출되는 경우 매년 민원이 제기되어 이를 해결하기 위해 기초조사를 실시하였고 확산방지 대책의 일환으로 도류제를 설치하기로 하였다.

본 연구에서는 도류제의 규모를 확정하기 위해 오염물질 확산모형을 이용하여 수치계산을 실시하여 도류제 설치전후에 대한 영향을 검토하였고 동시에 수리모형실험을 실시하여 도류제의 제원과 평면배치 등을 검토하였다(부산대학교, 2005). 이런 연구조사과정을 거쳐 유입토사의 확산제어대책의 일환으로 하구의 양안에 도류제를 설치하여 홍수시의 유출토사를 수심이 깊은 곳으로 유출시켜 깊은 수심에서 물질확산이 될 수 있도록 도류제의 제원을 결정하였다.

본 연구의 목적은 도류제 설치로 토사확산을 최소화시킬 수 있는 방안에 대해 수치계산과 현장관측을 통해 도류제의 제원과 평면배치의 타당성을 검증하고자 하였다.

## 2. 유입물질 확산모형

### 2.1 수질모형의 개요

하천, 호소 등에 유입되는 오염물질이 확산되어가는 현상을 예측하는 모형들이 국외에서 개발되어 국내에 적재적소에 이용되고 있다. 이 중에서 대표적으로 이용되는 모형은 QUAL2(EPA, 1981)로 텍사스 수자원 개발국(Texas Water Development Board)에서 이것을 확장하여 QUAL2E(Barnwell, 1987)로 개발하여 현재는 불확실성 분석항목을 추가하여 점오염원과 비점오염원을 다양하게 정상상태로 모의할 수 있다.

WASP4-5(Ambrose, 1988, 1993)모형은 미국의 EPA에서 수차례 수정과 보완을 거쳐 개발하여 하천, 호소, 하구에서 정상상태와 동적인 상태로 수질항목을 모의하는 모형이다.

CORMIX(Doneker, 1990)은 하수처리장의 방류 구에서 방출되는 물의 확산을 예측하는 모델로 적용되고 있다. 이모형은 밀도 층의 분사(jet flow)를 모의할 수 있다는 특성을 갖는다. 미공병단 수로 국(US Army Engineer Waterway Experiment Station : 이후 WES로 칭함)에서는 수질보전과 예측을 위해 CE-QUAL-W2(Cole, 2004)모형과 TABS-2(Thomas, 1985, 1991)모형을 개발하여왔다. WQRRS모형(HEC, 1978)과 HEC-5(HEC, 1998; Iwan, 2007)모형은 미공병단(Hydrologic Engineering Center)에서 개발하였다 이들 모형의 특성은 하천이나 호소에서 수질항목을 모의하는 모형으로 사용되는 기법과 적용조건이 약간씩 다르게 적용되고 있다. FastTABS(King, 1994)모형은 TABS모형을 보다

손쉽게 사용할 수 있도록 수로 국과 함께 개발하여 이용하고 있다. 본 연구에서는 RMA2(King, 1994; Charlton, 1999; WES, 2002, 2005)로 하천의 흐름과 하구에서의 조석 등을 이모형에 적용하고, RMA4(Norton, 1973; King, 1989)를 이용하여 모델하구에서의 유입토사 확산과정을 수치모의하여 적용성을 검토하기로 한다.

### 2.2 FastTABS모형과 적용

FastTABS모형은 기존의 TABS 모형을 보다 손쉽게 사용할 수 있도록 개선시킨 모형으로 GUI(Graphical User Interface)를 바탕으로 하는 Window용 프로그램으로 유한요소 모형이다. 이것은 수심이 얇은 흐름해석에서 수표면의 표고와 유속을 계산하는 모형으로 정상상태와 동역학적 모형의 토사확산계산이 가능하다. 본 모형을 간단하게 설명하면 자료를 읽어 계산에 필요한 이진파일을 만들어 주는 GFGEN(Geometry File GENeration)(WES, 2001)과 FastTABS의 중심으로 유속과 수위를 계산하는 RMA2, 그리고 수심방향으로 적분된 각 지점의 농도를 계산하는 RMA4로 구성되어 있다.

Charlton(1999)의 RMA2는 정상류와 부정류를 해석할 수 있고, 동수역학적인 문제를 풀기 위한 2차원의 평균 수심과 자유 수면을 고려한 유한요소 프로그램이며 King(1989)의 RMA4모형은 이를 이용하여 토사확산을 계산하는 프로그램이다. 즉, 시간에 따라 유량과 수표면 표고와 같은 다양한 경계조건을 설정할 수가 있다. 이러한 특성을 살려서 비교적 수리현상이 복잡한 하구에서 토사확산문제를 취급하는 것은 쉬운 일은 아니다. 하천의 수리특성으로 RMA2를 이용하여 하천 만족부를 중심으로 이지점의 수위곡선을 구하여 기술된 연구가 제시되었고(최한규 등, 2005), 파랑이 내습하는 곳에서의 수리현상을 정확하게 재현시키기 위한 연구는 해안을 연구하는 곳에서의 방향을 약간 전환하면서 하구로 접근하였다. 특히, RMA2와 RMA4를 이용하여 하구의 수리특성을 연구하는 것은 최근에 주어진 여건을 제한적으로 고려하여 연구가 진행되었다(민병형 등, 1990; 박무종 등, 1994; 김재중 등, 1995; 정용태 등, 2000; 이남주 등, 2007).

최근에 조석변동을 고려하여 오염물질 확산을 RMA2와 RMA4를 이용하여 연구하는 사례가 발표되고 있다(박상길 등, 2008; 서일원 등, 2008; 유민욱 등, 2008).

### 2.3 지배방정식

수심적분 2차원 천수방정식은 자유 수면을 가진 물의 운동을 기술하는 3차원 Navier-Stokes 방정식의 일반식을 수심방향으로 적분하여 연직방향의 가속도항을 무시하고 압력 항을 정수압 분포로 가정하면 식(2-1), 식(2-2), 식(2-3)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) + u \frac{\partial h}{\partial x} + v \frac{\partial h}{\partial y} = 0 \quad (2-1)$$

$$\begin{aligned} & h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \varepsilon_{xx} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \varepsilon_{xy} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ & + gh \left( \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{gu}{C^2} (u^2 + v^2)^{1/2} - \zeta V_a^2 \cos \psi \\ & - 2hwv \sin \phi = 0 \end{aligned} \quad (2-2)$$

$$h \frac{\partial v}{\partial t} + hv \frac{\partial uv}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{h}{\rho} \left( \varepsilon_{yx} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \varepsilon_{xy} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + gh \left( \frac{\partial a}{\partial y} + \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{gu}{C^2} (u^2 + v^2)^{1/2} + \zeta V_a^2 \cos \psi - 2hwv \sin \phi = 0 \quad (2-3)$$

여기서,  $x, y, t$ 는 좌표축과 시간,  $g$ 는 중력가속도,  $u$ 와  $v$ 는  $x, y$ 방향의 수심 평균유속,  $\rho$ 는 물의 밀도,  $h$ 는 수심,  $a$ 는 하상표고,  $\tau_x$ 와  $\tau_y$ 는  $x, y$ 방향으로 작용하는 외부응력 (Coriolis 효과에 의한 응력),  $\varepsilon$ 는 확산계수이다. 식(2-2)와 식(2-3)의 전단력인  $\tau_x$ 와  $\tau_y$ 는 식(2-4)과 식(2-5)로 표시된다.

$$\tau_x = \frac{gu}{C^2 h} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{\zeta}{h} V_a^2 \cos \psi - 2wv \sin \phi \quad (2-4)$$

$$\tau_y = \frac{gv}{C^2 h} (u^2 + v^2)^{1/2} - \frac{\zeta}{h} V_a \sin \psi + 2wu \sin \phi \quad (2-5)$$

여기서,  $C$ 는 Chezy 계수,  $\zeta$ 는 경험적인 바람 전단응력계수,  $V_a$ 는 풍속,  $\psi$ 는 풍향,  $w$ 는 지구의 각속 용대상 구간의 평균위도이다.

#### 2.4 유한요소 방정식

FastTABS(1994)에서 가중 잔차(Weighted Residual) 방법으로 지배방정식을 유한요소 식으로 변환하고 식(2-1), 식(2-2), 식(2-3)을 잔차의 형태로 표시하여 전개하면 식(2-6), 식(2-7), 식(2-8)과 같다.

$$\int_A N^T f_c dA = \int_A \left\{ N^T \left[ \frac{\partial h}{\partial t} + h \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) \right] \right\} \quad (2-6)$$

$$\int_A N^T f_u dA = \int_A \left\{ N^T \left[ \begin{array}{c} h \frac{\partial u}{\partial t} + hu \frac{\partial u}{\partial x} + hv \frac{\partial u}{\partial y} \\ + gh \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{gu}{C^2} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ - \zeta V_a^2 \cos \psi - 2hwv \sin \phi \\ + \frac{\partial h}{\partial x} \frac{\varepsilon_{xx} \partial u}{\rho \partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\varepsilon_{xy} \partial u}{\rho \partial y} \end{array} \right] \right\} dA + N_x^T \left[ \varepsilon_{xx} \frac{h \partial u}{\rho \partial x} - \frac{gh^2}{2} \right] + N_x^T \left[ \varepsilon_{xy} \frac{h \partial u}{\rho \partial y} \right] - \int_{\Delta x} N^T h \frac{\varepsilon_{xx} \partial u}{\rho \partial x} dy - \int_{\Delta y} N^T h \frac{\varepsilon_{xy} \partial u}{\rho \partial y} dx \quad (2-7)$$

$$\int_A N^T f_v dA = \int_A \left\{ N^T \left[ \begin{array}{c} h \frac{\partial v}{\partial t} + hu \frac{\partial v}{\partial x} + hv \frac{\partial v}{\partial y} \\ + gh \frac{\partial a}{\partial x} + \frac{gv}{C^2} (u^2 + v^2)^{1/2} \\ - \zeta V_a \sin \psi - 2hwv \sin \phi \\ + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\varepsilon_{yx} \partial v}{\rho \partial x} + \frac{\partial h}{\partial y} \frac{\varepsilon_{yy} \partial v}{\rho \partial y} \end{array} \right] \right\} dA + N_x^T \left[ \varepsilon_{yx} \frac{h \partial v}{\rho \partial x} \right] + N_y^T \left[ \varepsilon_{yy} \frac{h \partial v}{\rho \partial y} - \frac{gh^2}{2} \right]$$

$$- \int_{\Delta x} N^T h \frac{\varepsilon_{yx} \partial v}{\rho \partial x} dy - \int_{\Delta y} N^T h \frac{\varepsilon_{yy} \partial v}{\rho \partial y} dx \quad (2-8)$$

#### 2.5 유입물질 확산모형 구축

본 모델하구는 여름철 S계열 태풍의 영향과 NE계열에서 발달된 폭풍의 영향을 많이 받고 있다. 그러나 홍수와 같은 대출수시에는 홍수에 의한 흐름이 해빈류 보다 탁월할 뿐만 아니라 토사유입이 다량으로 유출된다. 이러한 점을 고려하여 유출되는 유량이 천해영역으로 진행하여 확산되는 형상을 정확히 파악하기 위하여 하구를 중심으로 설정하였다. Fig. 1은 모델 연구지역으로 소규모 하구와 상류개발 지역을 도시하였다. 이곳에 표시된 개발지역은 개발이 완료된 지역으로 신도시가 형성되어 가고 있는 중이므로 난개발이 하천 및 하구지형과 자연생태계에 미치는 영향을 검토할 수 있는 곳이기 때문에 지속적으로 연구의 대상이 되는 곳이다. 동시에 하구의 좌안은 양질의 모래가 쌓여 있는 깨끗한 해수욕장이고, 우안은 암반으로 형성된 절리가 발달된 곳으로 양호한 수질에 수산물이 생산되는 곳이다. Fig. 2는 모델영역의

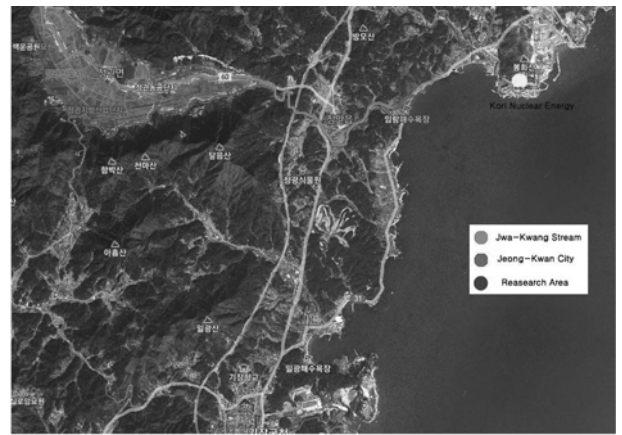


Fig. 1 Model river of research area

Table 1. Frequency vs. flood discharge in model river

Fre. (Yr)	Mea	1	30	50	100
Flood (cms)	0.72	135	474	530	605

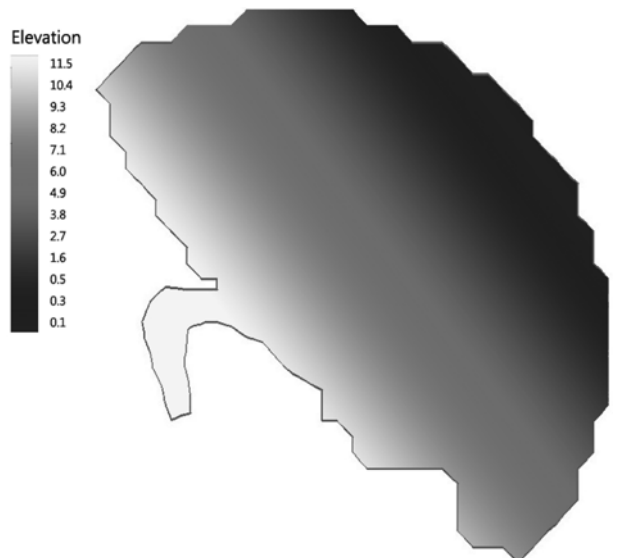


Fig. 2 Water depth to calculate sediment concentration diffusion

수심을 삼각형요소로 격자망을 만들어 구성하였다(Park 등, 2008). 수치계산시의 수심자료는 국토해양부에서 발행한 해도(No.180)와 현지 수심측량을 통해 작성된 수심측량도를 합성하여 작성하였다. 유출토사 확산계산을 위한 입력조건은 Table 1과 같은 모델하구의 빈도별 홍수량(부산광역시, 2003a, 2003b)과 인근해역항의 평균해면(M.S.L)인 50.9(부산광역시 기장군, 2005)로 하였다. 그리고 모델하천에서 홍수시에 하구에서 바다로 유출되는 토사농도는 100 ppm이다. 하구에서 바다로 유출되는 토사의 초기농도는 시간의 경과와 함께 분포형상을 공간적으로 도시하였다.

### 2.6 토사확산 수치모형실험

본 모델하구에서 현장검증에 의하면 홍수 시에 다량의 토사가 하천으로 유출되면서 하구폐색에 의해 퇴적된 토사와 같이 급속히 인근해안으로 토사확산이 발생하고 있음을 알았다. 수치모형실험에서는 이러한 점을 고려하여 유출되는 토사가 천해 역으로 진행하여 변형되는 형상을 정확히 파악하기 위하여 하구를 중심으로 Fig. 2와 같이 확산영역과 수심을 설정하여 2차원 흐름과 토사농도 확산모형 수치실험을 수행하였다. 수치계산에서 홍수유량은 Table 1의 빈도별 홍수량에 대하여 계산을 실시하였으며 토사확산이 정상상태에 도달 할 때(0.5시간 간격으로 24시간 계산)까지 일정한 것으로 하여 49주기 수행하였다. Fig. 3은 현장관측에서 강우지속 시간과 홍수유출량에 의해 발생하는 토사농도의 변화형상을 시간의 경과에 따라 가정된 것이다. 유입토사의 농도는 평상시에는 일정한 것으로 가정하였으며 1년 빈도 이상의 홍수 시에는 유출초기는 토사농도가 높고 시간이 지남에 따

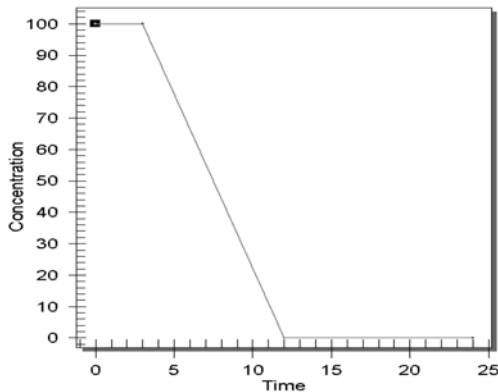


Fig. 3 Fluctuation concentration of influx sediment due to time of flow

Table 2. Total case of numerical calculation

Item	Without jetty		With jetty		Complex jetties	
	O	F	O	F	O	F
Condition of runoff	O	F	O	F	O	F
Frequency (yr.)	O	F	O	F	O	F
Time of flow (hr.)	0.5, 3, 6, 12, 18, 24	0.5, 3, 6, 12, 18, 24	0.5, 3, 6, 12, 18, 24	0.5, 3, 6, 12, 18, 24	0.5, 3, 6, 12, 18, 24	0.5, 3, 6, 12, 18, 24
Remarks	O : ordinary (less than 1yr.) F : flood (1, 30, 50, 100)					

라 점차적으로 낮아지는 것을 고려하여 Fig. 3과 같이 토사의 농도가 변하는 것으로 하여 0.5시간 간격으로 24시간 동안 49주기 수행하였다. 즉, 0~3시간까지는 유입토사의 농도가 100 ppm으로 일정하며 3~12시간까지는 토사농도가 직선적으로 감소하여 0이 되고 13~24시간까지는 하천으로부터 토사가 배출되지 않는 것으로 가정하여 각각의 시간동안의 토사농도의 확산과정을 예측하고자 하였다. 수치계산의 경우는 Table 2와 같다. 본 연구에서 실시한 수치계산은 크게 분류하면 도류제가 없는 경우와 있는 경우로 구분된다. 확률 빈도는 평상시와 홍수시의 1년, 30년, 50년, 100년으로 하여 각 경우에 대해 계산을 실시하였고 홍수 시작 후의 시간은 30분, 3시간, 6시간, 12시간, 18시간, 24시간으로 계산하였다.

### 3. 계산결과 분석

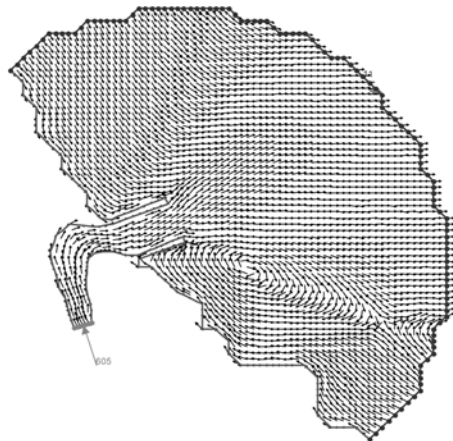
#### 3.1 유향분포

앞에서 설명한 FastTABS모형에서 각 절점에서 구한 유향 벡터를 등고선과 화살표로 도시하여 흐름의 형상의 일례를 Fig. 4에 도시하였다. RMA2에 의해 계산되는 유속은 등고선으로 모델하구에 도시하였다.

이 그림에 의하면 100년 빈도 유출량에 도류제를 설치하지 않을 경우는 좌측 해안부분에 약간의 와류현상이 보이지만 전반적으로 하구에서 바다로 유량이 유출되는 경향을 보이고 있다. 도류제를 설치하면 좌안보다 우안에서 와류가 크



(a) without jetty



(b) with both right and left jetty

Fig. 4 Distribution of direction vector without jetty and with both jetty at model estuary(100yr)

게 발생되며 도류제 내부에서 유출이 바다 쪽으로 형성되고 있음을 알 수 있다.

### 3.2 유속분포

#### 3.2.1 돌제가 없는 상태의 유속분포

Table 1의 빈도별 홍수량을 입력조건으로 하여 계산한 유속의 결과의 일례를 Fig. 5(a)와 Fig. 5(b)로 나타내었다. Fig. 5(a)의 경우 평수시의 주된 하천 흐름은 해안에 접하면서 유속이 거의 없는 상태로 좌안의 해수욕장에서 우안 방향으로 군데군데 지형적인 영향으로 와류가 발생하고 있다. 유속분포는 0.01 m/sec 전후로 유출로 인한 영향 영향은 미미하다. Fig. 5(b)의 경우 홍수가 발생되면 빈도별 홍수량이 증가함에 따라 와류의 발생은 볼 수 없고 유속의 크기는 우안보다 좌안의 해수욕장 방향으로 갈수록 증가하고 있음을 알 수 있다. 단 하구근처에서는 우안과 좌안에서 동일한 유속크기가 발생하고 있음을 알 수 있다. 이러한 유속분포 형성으로 보아 흐름은 좌안의 해수욕장 해안선 및 외해 방향으로 형성되고 있음을 유추할 수 있다. 즉, 유속은 홍수량이 증가함에 따라 하구부근 및 좌안해수욕장 전면에서 빨라지며 그 영향 범위도 넓어짐을 알 수 있다.

#### 3.2.2 우안 도류제 설치시의 유속분포

우안 도류제만을 설치하여 유속수치 모형실험 결과의 일례

를 Fig. 5(c)에 나타내었다. 계산결과를 보면 평수시의 유속의 크기는 하구에서는 동일한 0.01 m/sec로 나타나고 있다. 단 도류제 설치로 인해 흐름의 형상은 약간 달라지고 있는 경향이 있다. 수심이 얇은 곳에서는 우안도류제의 영향으로 좌안의 해수욕장 방향으로 흐름이 형성되고 있으며 도류제 끝단에서는 와류가 형성되고 있다. 빈도별 홍수량이 증가함에 따라 도류제 끝단에서는 커다란 와류가 발생하고 흐름의 형성은 하구 부 전면해역의 외해 방향으로 형성되며 유속의 크기도 도류제 설치이전 보다 도일 영역에서 감소하고 있음을 알 수 있다. 또 도류제에 의한 동일유속의 분포면적이 설치전보다 좁아지고 있음을 알 수 있다. 유속의 크기는 홍수량이 증가함에 따라 하구부근 및 좌안해수욕장 전면의 유속이 빨라지며 그 영향의 범위가 좌안으로 넓어지고 있음을 알 수 있다.

#### 3.2.3 양쪽도류제 설치 시 유속분포

양안에 도류제를 설치하여 계산한 일례를 Fig. 5(d)에 도시하였다. 유속크기와 흐름의 형상은 거의 변화가 없다. 모 델하천에서 빈도별 홍수량이 증가함에 따라 우안도류제가 설치된 후보다 도류제의 끝단까지 유속의 크기가 동일하게 분포하고 도류제 끝단에서 0.5 m/sec의 크기를 갖는다. 도류제 끝단을 벗어나면 급속히 유속이 감소하면서 우안도류제 방향으로 치우쳐서 흐름이 발생하고 있다. 따라서 전반적인 흐

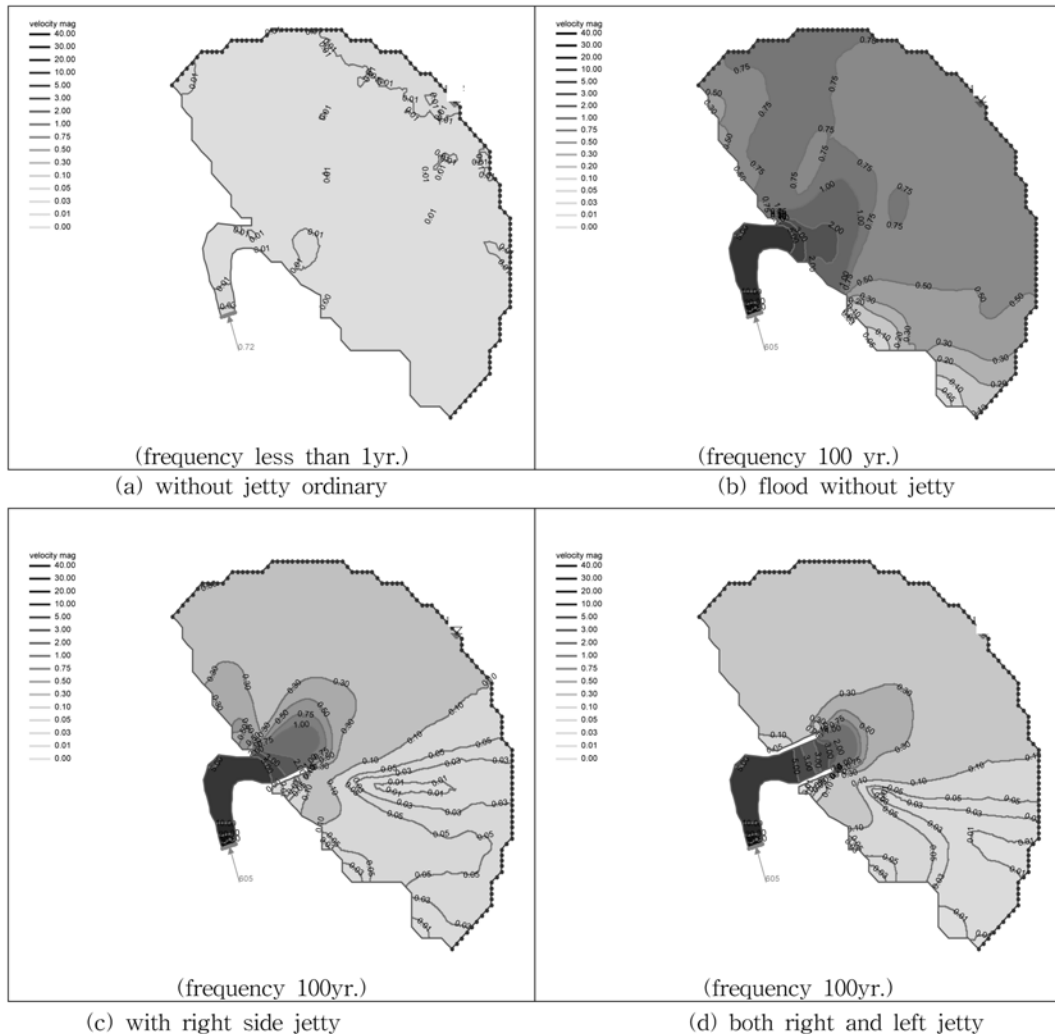


Fig. 5 Distribution of current due to jetty at model estuary

름형상은 하천 하구 전면해역의 외해 방향으로 형성되며 유속은 도류제 끝단에서 유속이 감소하기 시작하여 수심이 깊은 곳에서 동일한 유속이 형성되면서 우안방향으로 흐름의 방향이 형성되고 있다. 또 우안도류제 하나만 설치된 후의 경우보다는 도류제 내부의 유속은 빨라지고 양쪽 도류제 전면의 해역에서는 유속이 감소하고 있다.

### 3.3 토사확산 농도분포

#### 3.3.1 도류제를 설치하지 않을 경우

홍수 시에 상류에서 하구로 유입되는 토사의 농도는 매우

높은 값을 갖는다. 토사농도 확산분포를 계산하기 위해서 토사농도 확산의 변화를 현장 검증을 통하여 3단계로 구분하였다. 첫 단계는 일정한 토사가 배출되기 시작할 때를 유출이 시작되어 0.5시간이 지나 정상상태가 된 0.5시간부터 3시간까지는 고농도가 연속적으로 유입되는 상황, 둘째 단계는 고 농도에서 점차 감소하여 유입농도가 0이 될 때까지(3시간에서 12시까지 9시간동안) 일정한 기울기로 감소하고 있는 상황, 셋째 단계는 토사의 농도 배출이 전혀 없는 시간이 계속 진행되는 상황(유출 시작 12시간에서 24시간 후)로 나누어 토사농도 확산과정을 나타내었다.

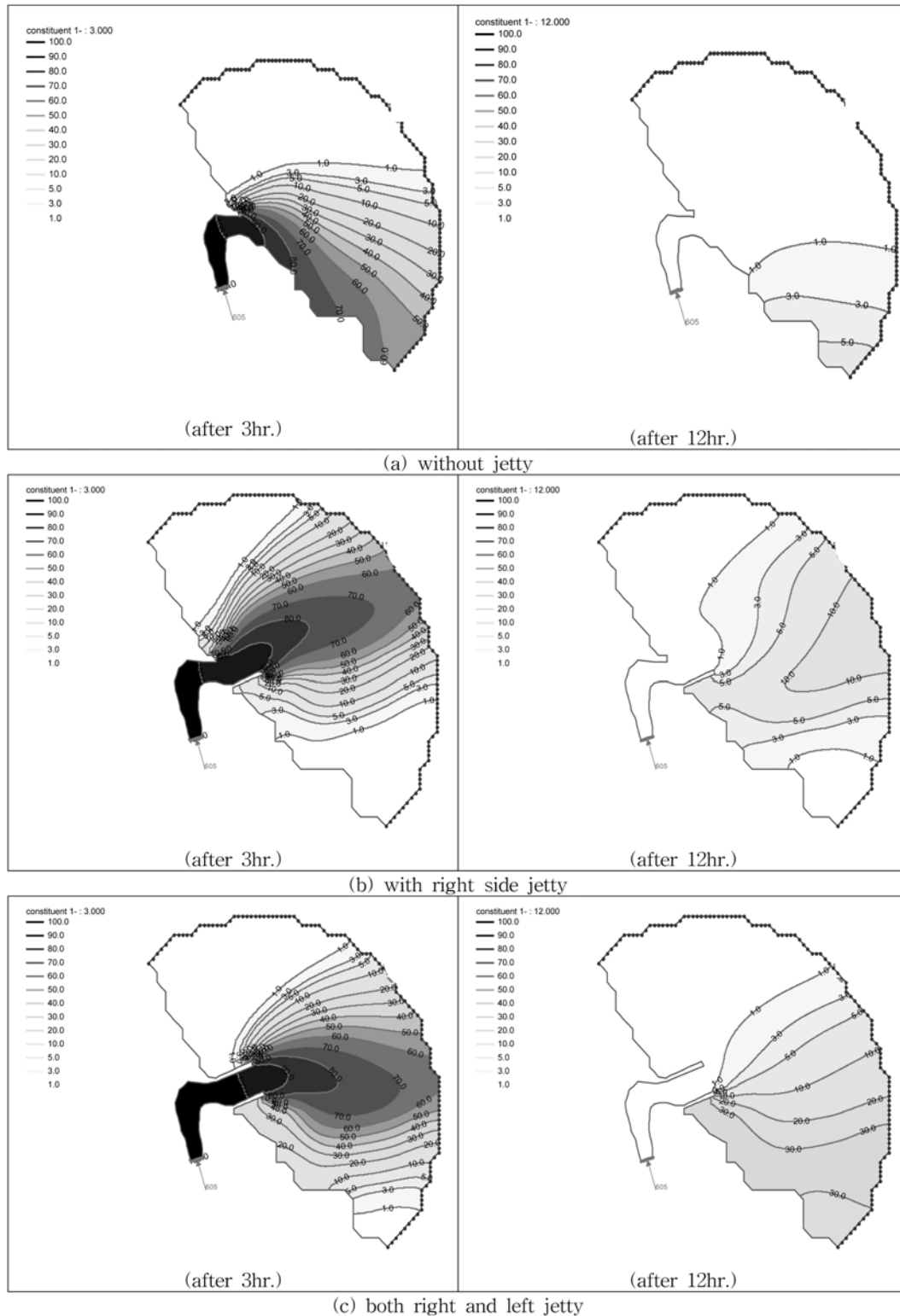


Fig. 6 Distribution of concentration due to jetty at model estuary

계산결과에 의하면 평상시 유입유량에 대해서는 도류제를 설치하지 않을 경우는 시간의 경과에 따라서 하구를 중심으로 토사농도 확산이 발생되고 있다. 하지만 홍수 시는 Fig. 6(a)에서 알 수 있듯이 홍수량이 증가함에 따라 토사의 탁도가 일정하게 유지될 때(유출 개시 후 0~3시간)에는 모델하천 하구에서 우안방향으로 토사농도 확산이 가속화 되며 그 영향범위도 점차 확대되나 토사의 농도가 감소하여 모델하천으로 부터의 배출이 없을 때(유출 개시 후 3~24시간)는 우안방향으로 토사의 농도가 저감되어 유출량이 많을수록 저감속도는 빨라짐을 알 수 있다. 토사확산 농도 수치실험결과를 여기서는 일례로 Fig. 6(a)과 같이 두 단계만을 시간의 경과에 따라 나타내었다. 토사농도의 확산은 주방향 흐름이 좌안의 해수욕장에서 우안방향으로 형성되고 있고 유출량이 많아질수록 유속이 빨라지고 있다.

### 3.3.2 우안도류제를 설치할 경우

평상시는 우안도류제만을 설치할 경우는 시간의 경과에 따라서 확산 농도범위가 우안에서 좌안의 해수욕장 방향으로 이동되고 있음을 알 수 있다. 즉, 확산 영향범위는 우안도류제로 인해 확산이 차단되어 도류제가 설치되지 않은 현 상태에 비해 우안해수욕장 방향으로 확대됨을 알 수 있다. 홍수 시는 Fig. 6(b)에서 알 수 있듯이 빈도별 홍수유출량이 증가함에 따라 토사의 농도가 일정하게 유지될 때(유출 개시 후 0~3시간)에는 하천 하구 부 전면해역의 외해 방향으로의 토사농도 확산이 가속화 되며 그 영향범위도 점차 확대되나, 토사가 감소하여 하천으로 부터의 배출이 없을 때(유출 개시 후 3~24시간)는 우안도류제 방향으로 약간 치우쳐 농도가 점차적으로 저감되고 있다. 하천으로 부터의 유출량에 비례하여 저감속도가 빨라지나 도류제가 설치되지 않은 현 상태에 비해서는 농도의 저감속도가 상당히 지연됨을 알 수 있다.

### 3.3.3 양쪽 도류제를 설치할 경우

평수시의 확산영향 범위는 양쪽 도류제가 완성됨으로 인해 해안선 부근에서는 양쪽 도류제에 의해 농도확산이 차단되어 우안도류제 하나가 설치된 상태에 비해 도류제 내부의 토사의 농도가 가중되고 도류제 전면해역에서의 확산범위가 다소 확대되고 있다. Fig. 6(c)에서 알 수 있는 것과 같이 하천의 빈도별 홍수량이 증가함에 따라 토사의 농도가 유출 개시 후 0~3시간에는 하천 하구 도류제 전면외해 방향으로의 토사농도 확산이 가속화 되며 그 영향범위도 점차 확대되나 우안에 하나만 도류제가 설치 된 후보다 우안방향으로 약간 치우쳐 확산이 진행된다. 토사 농도가 감소하기 시작하여 하천으로 부터의 토사유출이 없는 경우 즉, 유출 개시 후 3~24시간에도 우안도류제 하나가 설치 된 후보다 우안방향으로 치우쳐서 토사의 농도가 점차적으로 저감된다. 저감속도는 하천으로 부터의 홍수량에 비례하여 빨라지고 있으나 우안도류제만 설치된 경우보다 양안에 양쪽 도류제를 설치할 경우가 더욱 지연되고 있다.

## 3.4 현지 적용성 검토

### 3.4.1 도류제 제원

도류제의 제원을 Fig. 7에서 정면도와 평면도를 제시하였

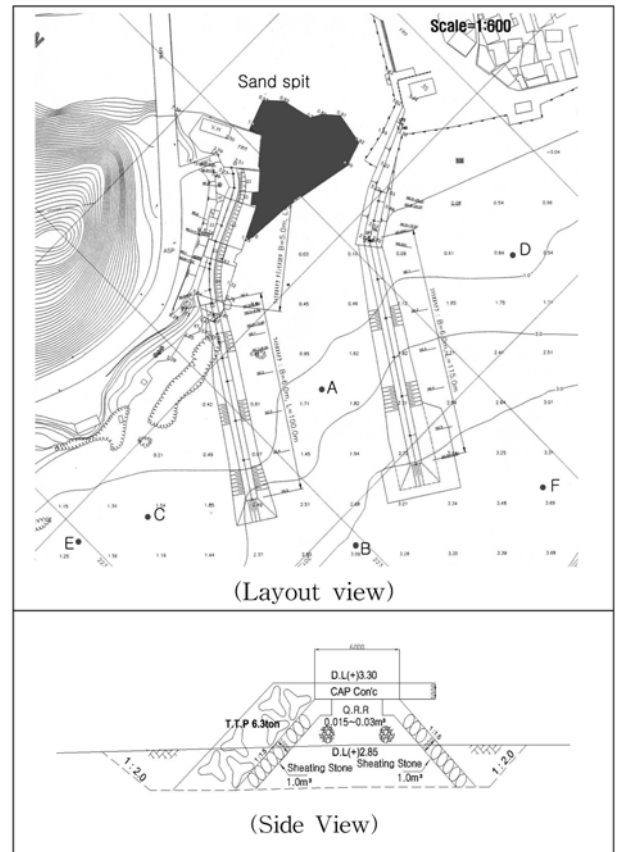


Fig. 7 Typical plane and cross section of jetty

다. 기존의 도류제에서 연장하여 설치하였다. 기존의 도류제는 30 m 정도로 매우 짧아 파랑이 하구 깊숙한 곳 까지 침입하고 있었다. 이런 이유로 좌안의 백사장이 침식되면서 모래가 빗금 친 부분으로 밀려와서 시주가 발달하여 하구폐색이 매년 발생되고 있었다. 시주는 가을에서 봄 사이에 형성되어 여름철 홍수기에 바다로

유출되고 있다. 양쪽 도류제 설치로 인해 시주의 발생은 나타나지 않고 있다. 이 그림 중에 A점, B점, C점, D점, E점, F점은 현장에서 농도를 측정된 지점이다. 특히, 도류제 설치 이전은 시주(Sand Spit)의 규모가 2000 정도이며, 이로 인해 매년 하구폐색이 발생하고 있었다(Park등, 2008). 현장의 관측 측점은 6지점으로 평면도에 표시하였다.

### 3.4.2 양쪽 도류제 설치전후 농도분포

설치된 도류제가 홍수 시에 제 기능을 다하고 있는지를 확인하기 위해 현지조사를 설치 전후로 실시하였다. 설치전의 상황과 설치후의 상황을 파악하여 도류제의 제원과 설치

Table 3. Rainfall situation and control point concentration

Item	Date	Rainfall intensity (mm/hr)	Total rainfall (mm)	Mean concentration of 'A' point (ppm)
Before construction	2005.9.6	7.1	161.5	62.5
	2006.5.6	7.0	99.5	81.7
After construction	2007.10.8	5.6	96	102.3
	2008.8.13	24.9	174	83.4

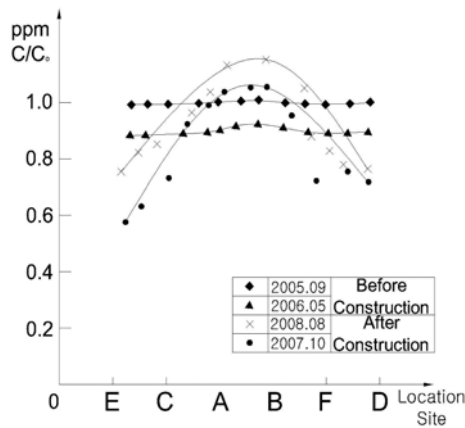


Fig. 8 Distribution of sediment concentration at the field

당시에 이곳의 수리특성에 대한 도류제의 적용성을 검토하기로 하였다. 도류제를 설치하기 전에는 상류의 개발로 인해 홍수기에는 하구에 높은 농도가 발생하여 민원의 원인이 되기도 하였다. Table 3은 현장관측을 실시할 때의 상황을 간단히 요약한 것이다. A점의 평균농도는 강우 시에 관측에 의해 여과법에 의해 구한 평균농도를 기준 값으로 하였다. 이 값이 측정 점에서 어떻게 분포하는가를 조사하여 확산의 형태와 확산의 범위를 구하고자 하였다.

도류제 설치 이전과 이후의 토사농도 확산형태와 확산영역을 검증하기 위해 4회에 대해 현장에서 부유사 농도를 측정하였다. Fig. 8은 현장에서 측정된 값을 도류제를 중심으로 양안에 대해 정리한 것이다.

이 그림에 의하면 설치전후에 대한 토사확산의 형상분포가 달라지고 있다는 것을 알 수 있다. 설치 이전의 분포형상은 하구를 중심으로 양쪽 방향으로 토사의 동일농도 확산이 해안선에 평행하여 분포되고 있지만, 양쪽 도류제 설치 이후는 도류제를 중심으로 양쪽 방향으로 균일 농도가 분포하지 않고 도류제 내부와 끝단에서는 고농도가 관측 되었고 양쪽 도류제 외곽에서는 이 보다 적은 농도가 관측 되었다.

이는 양쪽 도류제에 의해서 유입파랑을 차단하므로 인해 홍수량이 일시에 외해로 유출되어 희석이 된 후 다시 해안선으로 흐르고 있기 때문이다. 따라서 양안의 해안선 가까이는 양쪽 도류제로 인한 농도지체현상이 발생하고 있어 초기 유출에 대한 고농도의 토사농도가 유입되지 않고 있음을 검증하였다. 토사농도 확산범위에 대해서는 수치계산결과에 대한 검증을 위해 관측 값을 시간의 경과에 따라 도시하기 위해 노력하였지만 관측지점의 범위를 폭 넓게 검증하지 못해 협소한 영역에서의 검증만을 실시한 것이 문제점으로 남아 있다.

#### 4. 결 론

본 연구로부터 얻은 결과를 정리하면 다음과 같이 4가지로 요약할 수 있다.

1. 모델하천 하구에서 홍수량이 지배하는 소규모 하구 흐름이라도 정확한 부유 토사의 확산거동을 모의하기 위해서는 본연구의 대상 영역처럼 파랑의 영향을 받는 하구에서는 조석과 파랑에 의한 흐름을 동시에 고려하는 것이 타

당하다.

2. 소규모 하구에 양쪽 도류제를 설치할 경우 양쪽 도류제 내부의 흐름에 대해서는 파랑에 의한 흐름효과를 고려하지 않고, RMA2모형으로 유속을 계산해도 유속분포의 현장 적용성에 대한 타당성은 충분하다.
3. RMA2모형에 대해 계산된 유속으로 RMA4모형을 이용한 소규모 하구에서 토사농도확산을 계산하여 현장상황과 비교할 때 양쪽 도류제의 유무에 관계없이 해안선 부근에서는 동일한 분포형상을 얻을 수 있었다. 따라서 소규모하천 하구에 양쪽 도류제를 설치하여 홍수시의 토사농도 확산 범위를 제어하기 위하여 사용된 수치모형 중에서 간략한 계산방법이지만 본 모델도 충분히 인정을 받을 수 있다.
4. 본 모델 하구에 양쪽 도류제 설치로 인해 토사 농도가 동일지점에서 설치후가 설치 전 보다 농도가 저감되고 있는 것을 현장관측을 통하여 입증하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

#### 참고문헌

김재중, 김기철, 이정만(1995) 낙동강 하구에서의 부유사 거동에 관한 연구, **동아대학교 해양자원연구소 연구논문집**, 동아대학교 해양자원연구소, 제8권, 제1호, pp. 49-60.

민병형, 이상화, 김인철(1990) 금강 하구부의 점착성 부유사 확산에 관한 수치모형, **동아대학교 해양자원연구소 연구논문집**, 동아대학교 해양자원연구소, 제3권, 제1호, pp. 3-11.

박무중, 김중훈, 윤용남(1994) RMA-4에 의한 한강하류부에서의 오염물 확산이송 특성연구, **대한토목학회 1994년도 학술발표회 논문집**, 대한토목학회, 제2호, pp. 89-92.

박상길, 윤중수, 김병달, 김도훈, 이시호, 지 운(2008) 도류제 설치로 인한 사빈의 지형변동에 관한 연구, **한국수자원학회 2008년도 학술발표회 논문집**, 한국수자원학회, pp. 524-528.

부산광역시 기장군(2005) **임랑 해수욕장 좌광천 주변 정비(수리모형실험)**, 연구보고서, 부산광역시, pp. 83-192.

부산광역시(2003a) **부산시 정관 지방 산업단지 개발 산업 재해영향 평가**. 평가서, 한국토지공사, pp. 187-199.

부산광역시(2003b) **좌광천 하천정비 기본계획 수리모형실험**, 연구보고서, 대한주택공사, pp. 4-36.

서일원, 송창근, 이명은(2008) 서해안 조위를 고려한 한강 하류부의 흐름 및 확산. **한국방재학회 2008년도 정기총회 및 학술발표 논문집**, 한국방재학회, pp. 199-202.

유민욱, 김영도, 류시완, 서일원(2008) 마산만에서의 담수 유입시 오염물의 이송 및 확산. **한국방재학회 2008년도 정기총회 및 학술발표 논문집**, 한국방재학회, pp. 795-798.

이남주, 김영도, 권재현, 신찬기(2007) 수문운영에 따른 서낙동강 수질변화에 관한 이차원 수치모의, **상하수도학회지**, 대한상하수도학회, 제21권, 제1호, pp. 101-112.

정용태, 박원길(2000) RMA-4 모형에 의한 동천하류부에서의 현탁 물질 확산 특성 연구, **환경관리학회지**, 한국환경관리학회, 제6권, 제3호, pp. 315-322.

최한규, 백효선, 이계운(2005) 댐 하류 만곡부 하천에 대한 수리학적 특성 연구. **강원대학교 산업기술연구소 논문집**, 강원대학교 산업기술연구소, 제25권, 제A호, pp. 3-14.

Ambrose, T.B. et al. (1988) **WASP 4. A Hydrodynamic and Water Quality Model. User Manual and Programmer's Guide**. Natl. Technical information, U.S.A., Athens, Ga.



- Ambrose, R.B., Wool, T.A., and Martin, J.L. (1993) the water quality analysis simulation program. *WASP5 User's Manual*, EPA, U.S.A.
- Brigham Young Univ. (1994) *FastTABS3.0*. Hydrodynamic Modeling Reference Manual Engineering Graphics Laboratory, Provo, Utha.
- Brown, L.C. and Barnwell, T.O. (1987) The enhanced stream water quality models QUAL2E. *Documentation and User Manual*, EPA, U.S.A.
- Charlton, R.A. (1999) Initial stage in the development of coupled hillslope hydrology floodplain inundation model. *Phys. Chem. Earth(B)*, Vol. 24(1-2), pp. 37-41.
- Cole, T.M. and Wells, S.A. (2004) CE-QUAL-W2: A Two Dimensional Laterally Averaged Version 3.2. *User Manual*, Hydrodynamic and Water Quality Model, U.S. Army Corps of Engineers, Vicksburg, MS.
- Doneker, R.L. and Jirka, G.H. (1990) *CORMIX1: An expert system for mixing zone analysis of conventional and toxic single port aquatic discharges*. Environmental Res, Lab., U.S.A., Athens, Ga.
- Environmental Protection Agency (1981) *Computer Program Documentation for Stream Quality Model (QUAL)*. EPA Center for Water Quality Modeling, U.S.A.
- Hydrologic Engineering Center (1978) *Water Quality for River-Reservoir Systems WQRRS*. US Army Corps of Engineers, California.
- Hydrologic Engineering Center (1998) HEC-5 Simulation of Flood Control and Conservation Systems. *US Army of Engineers*, U.S.A., pp. 1-12.
- Ian P. King and Richard R. Rachiele (1989) RMAP4-A two Dimensional Finite Element Water Quality Model Version 3.0. *Program Documentation*, Resource Management Associates, U.S.A., Virginia.
- Ian P. King (1994) *RMA2/RMA4 Primer*. Brigham Young Univ. - Engineering Computer Graphics Laboratory, Provo, Utha.
- Iwan M. Thomas and David T. Williams (2007) Common Modeling Mistake Using HEC-RAS. *2007 World Environmental Water Resources Congress of ASCE*, U.S.A., pp. 1-3.
- Norton, W.R., King, I.P., and Orlob, G.T. (1973) *A finite element model for lower granite reservoir*. Water Resources Engineers, Inc., walnut, California.
- Park, S.K. and Yoon, J.S. (2008) Analysis for the dispersion zone of sediment concentration flowed into the small estuary. *2008 World Environmental Water Resources Congress of ASCE*, U.S.A., pp. 1-11.
- Thomas W.A. et al. (1985) *Open Channel Flow and Sedimentation TABS-2*. Waterways Experiment Station, The US Army Corps of Engineers, U.S.A.
- Tomas, W.A. and McAnally, W.H., Jr. (1991) Openchannel flow and sedimentation TABS-2. *User's manual for the generalized computer program system*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
- U.S. Army Engineer research and Development Center WES (2001) *Users Guide to GFGEN Version 4.35*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S.A.
- U.S. Army Engineer research and Development Center WES (2002) Waterways Experiment Station Coastal and Hydraulic Laboratory. *RMA-2 WES Version 4.5 Users Tour Guide*, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S.A., pp. 1-265.
- U.S. Army Engineer research and Development Center WES (2005) *Users Guide to RMAP-2 WES Version 4.5*. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, U.S.A.

(접수일: 2009.4.17/심사일: 2009.5.20/심사완료일: 2009.8.5)