

조간대 발달영역에서 개발에 따른 유동환경변화 해석

정재현* · † 김강민** · 이중우*** · 정영환* · 전성환*

*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과, ** (주)세일종합기술공사 기술연구소, ***한국해양대학교 건설환경시스템공학부 교수

Analysis of a Change of Hydrodynamic Environments due to the Port Developments in the Intertidal Zone

Jae-Hyun Jung* · † Kang-Min Kim** · Joong-woo Lee***

· Young-Hwan Jeong* · Sung-Hwan Jun*

*Dept of Civil and Environmental Engineering, Graduate Division, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**Port and Coastal Development Institute, Seil Engineering Co., Ltd. Seoul 150-051, Korea

***Prof., Division of Civil and Environment Engineering, Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요 약 : 현재 개발이 진행 중인 범성항은 하천과 바다의 경계구간인 하구항의 환경과 조석 및 하천수의 영향으로 인하여 발생하는 조간대가 잘 발달되어 있다. 또한 지형적으로 만 내가 깊어 깊어지고 인근에 위치한 와탄천과 전남방조제로 인한 유량에 의한 조위변동이 심한 지역이다. 해양물리적 영향을 검토하기 위한 기초 단계에서 이러한 해역에서의 조석 수치모의는 중요하며 또한 어려움이 따른다. 또한 구축된 모형은 해양조사 자료를 기반으로 하여 검증단계를 거친 후에 실험을 수행해나가야 한다. 본 연구에서는 이러한 개발과정 중인 범성항을 대상으로 하여 수치모형을 구축한 후, 과거 지형에 대한 예측작업을 수행하고 이를 바탕으로 다시 미래에 대한 예측작업을 수행하였다. 수행결과, 내만의 개발에 따라 개발 전과 비교하여 창조시 유속이 감소하고 낙조시 유속이 증가한 것으로 나타났으며, 조위의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 하구 환경, 조간대, 조위변동, 조석 수치모의, 수치모형

Abstract : The under developing estuarial port Bupsung is bounded by a river and the sea, and has several well developed tidal lands, where the littoral drift is strong due to the tide and the river discharge. The study area is located at the inner part of a concave bay and has a large tidal range due to the water discharge through the Watan-chun and Junnam-dike. In beginning stage of the ocean physical impact study, the tidal modeling is very important and difficult especially in this area. Moreover, we need a model experiment after the verification of the formulated model based on ocean survey. In this study, we constructed a numerical model to the Bupsung port coastal boundaries, which varies with the past and future development and made simulation with it. The result after development shows that there is a decrease of velocity on flood current and a increase on Ebb current and the minor variation of the tide level, compared with before development.

Key words : Estuary environment, Flat(intertided), Tidal variation, Tidal modeling, Numerical model

1. 서 론

하구는 인접 육지의 크고 작은 강으로부터 담수가 정기적으로 유입되어 해수면에 그 영향을 미침으로 인해 먼 바다와의 해수 교환이 이루어지는 강 입구의 연안 해역이다. 하구 환경은 조석 영향과 같은 해수유동기구와 강이나 하천으로부터 유입되는 퇴적물 입자들로 인한 유사이동체계에 기인하게 되는데 특히, 조간대의 동수역학과 밀접한 관계가 있어(Pritchard et al., 2002) 조간대가 잘 발달되어 있고 조석 간만의 차가 큰

해역에서 개발이 진행될 경우, 해양환경 변화는 필연적이다. 이러한 해양환경 변화의 저감안을 찾기 위한 기초단계는 해양물리 조사이며 이러한 조사를 바탕으로 한 조석 수치모의를 통하여 하구 해역이 물리 환경적 예측실험이 수행된다. 조석 수치모의의 결과값은 오염확산실험, 수질예측실험, 퇴적물이동실험, 해양생태계실험의 입력값으로 이용되기 때문에 높은 정확도가 요구된다.

본 연구 대상해역은 우리나라 서해안에 위치한 곳으로 서쪽으로 고군산군도 남단과 안마군도가, 북쪽으로 줄포항이 위치

* 대표저자 : 정재현(정회원), kkull@nate.com 051)410-4981

† 교신저자 : 김강민(중신회원), kikami@seileng.com 02)840-5182

*** 중신회원, jwlee@hanara.hhu.ac.kr 051)410-4461

* 정회원, snagrag@samsung.com 051)410-4981

* 정회원, skyjeun820@hanmail.net 051)410-4981

해 있는 범성포 해역으로 입구부에 도읍소도 등의 산재된 도서와 입구부부터 발달된 조간대로 인해 외해로부터 차폐되어 있으며 전반적으로 조석의 영향이 탁월한 곳이다(Fig. 1). 항 입구부 하폭은 약 700m, 하구연장은 약 5,000m에 달하며, 남쪽으로 유로연장 약 12km의 와탄천 및 매립지 배후지에 두암지 등의 크고 작은 저수지가 있어 갈수기와 홍수시 조위변동이 심한 지역이다.

본 연구에서는 조간대가 발달한 범성포 해역에서의 항만개발에 따른 동수역학적인 변화와 조간대의 변화 양상을 확인하고, 조간대 처리기법에 대하여 고찰하였다.

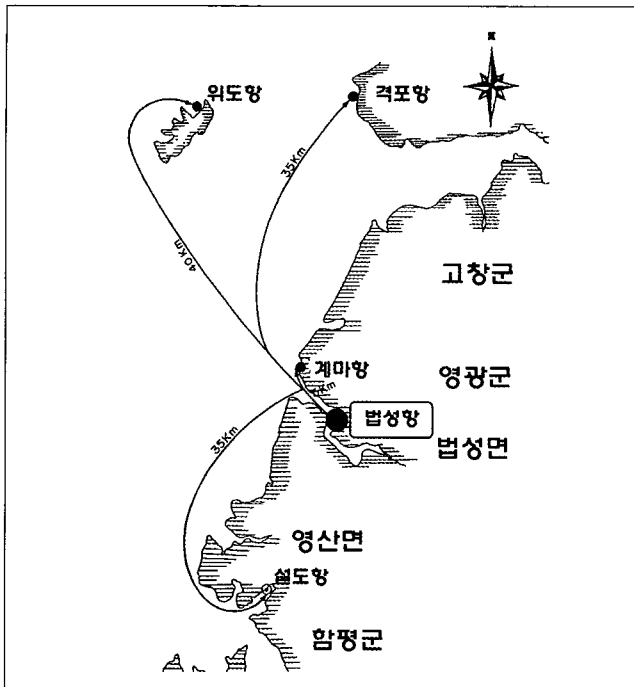


Fig. 1 Location of Bupsung-po waters

2. 실험방법 및 제조건

2.1 실험방법 및 조건

해수유동 수치모형실험은 모형의 수립, 검증 및 예측 실험의 과정으로 수행된다. 모형의 수립은 대상해역을 적절한 격자망으로 분할한 후 최신의 지형자료를 이용하여 해안선과 수심을 모형 내에 재현하는 단계이고, 다음 과정인 모형 검증에서는 수립된 모형을 운용하여 현재 상태에 대한 모형 결과가 현장 관측치와 잘 일치할 때까지 개발경계조건 및 각종 계수조건을 적절히 조정하는 과정이다. 위 과정을 통해 조위 및 조류

검증이 완료되면 사업시행으로 인한 조건 변화를 모형에 재입력하여 예측실험을 수행하고 그 결과를 분석·평가하게 된다.

본 실험에서 계산영역은 범성포 해역을 포함한 동서로 8.0km, 남북으로는 5.0km로 설정하였다. 격자간격은 25m 간격의 등격자를 사용하여, x, y 직각좌표계에서 x방향으로 320개, y방향으로 200개의 격자선으로 구분하여 실험을 수행하였다. 사용된 지형 및 수심자료는 최신의 정보를 담기 위하여 각종 개발계획 자료를 조사·수집하였으며, 공사 진행정도를 판단하여 가장 적절한 지형 및 수심을 입력하였다. 금회 실험은 2006년 12월의 해양조사 자료를 이용하기 때문에 당시 범성포 해역 내의 상황을 근거로 수행하였다. 따라서, 개발이 진행 중인 범성포 해역에 대한 실험이 완료된 후, 수립된 모형을 바탕으로 개발완료후와 현재 상태에 대한 실험이 수행되었다. 실험을 위한 적용모형은 POM(Mellor, 1998)으로 선정하였고 조석조건은 주요 4대분조인 M₂, S₂, K₁, O₁분조를 고려하여 대, 중, 소조기가 포함되는 15일로, 와동점성계수는 Smagorinsky type diffusivity를, 저면마찰계수인 Manning 마찰계수(n)는 조간대 영향을 고려하여 0.035으로 다소 크게 설정하였다. 수치모의에서 바람응력효과는 고려하지 않았고, 해수 유동장에 대한 초기조건은 해수 유동이 없는 것(cold start)로 설정하였다.

현재 개발이 진행 중인 범성포 해역의 개발에 따른 조석환경 변화를 파악하기 위하여 2006년 12월 상황을 CASE 06, 과거의 개발이 착수되기 전 상황을 CASE EX, 그리고 개발이 완료된 후를 CASE AF로 설정하여 수치모의를 수행하였다. Fig. 2는 범성항의 개발 진행상황을 도시하였다.

Table 1 Summary of simulation case

Case	Aspect of case
Case EX	Before development
Case 06	Present(while developing)
Case AF	After development

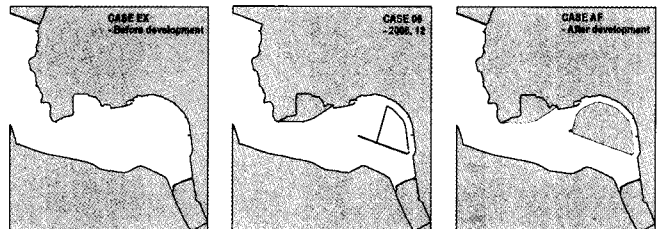


Fig. 2 The development stage of bupsung port

2.2 조간대 처리기법

조석의 영향을 받는 해안 및 하구는 수위의 시간적 변화에

Table 2 Variation of tidal flat about simulation case in the spring tide

Case	Flat grids including developing area		Flat grids excluding developing area	
	Low tide	High tide	Low tide	High tide
Case EX	4,217	17	3,292	9
Case 06	3,991	20	3,307	9
Case AF	3,711	12	3,259	9

따라 흐름이 접하고 있는 연안경계의 좌표가 시간의 함수로 된다. 간조시 수위가 일정한 높이 이하로 하강하면 주위보다 비교적 높게 위치한 수로 바닥은 수면위로 모습을 드러내게 된다. 이런 경우에 대한 수치모의는 고정격자를 이용하는 경우 많은 연구가 이루어졌다. 수심적분 2차원 모형에서 수면변위와 수심이 동일 좌표상에서 정의되지 못하므로 Stelling et al.(1986)은 총수심을 세 가지 방법으로 산정하여 각 방법의 특성과 장단점을 밝히고 이에 따라 수치해가 적지 않은 영향을 받게됨을 지적한 바 있다. 조간대의 수치적 모의에 있어서는 이동경계부근에서 비현실적 교란파가 발생할 수 있는데 Falconer and Owens (1987)은 조간대의 특정 격자가 수위강하에 의해 해석대상에서 제외되는 순간 수심평균유속에서 발생하는 불연속의 강도를 경감시키는 방법으로 이를 해결하고 있다(이남주, 1999) 본 연구에서는 조간대 처리는 Flather and Heaps(1975)가 개발한 방법을 이용하여 모형을 수정하였다. 즉 조간대는 다음의 세 가지 경우 중 하나라도 해당되지 않으면 i 번째의 격자가 노출되는 것으로 처리하여 유속을 0으로 준다.

$$(i) D_{i-1}^{n+1} > D_c \text{ and } D_i^{n+1} > D_c \quad (1)$$

$$\text{or (ii) } D_{i-1}^{n+1} \leq D_c \text{ and } D_i^{n+1} > D_c \text{ and } \eta_i^{n+1} - \eta_{i-1}^{n+1} > \epsilon$$

$$\text{or (iii) } D_{i-1}^{n+1} > D_c \text{ and } D_i^{n+1} \leq D_c \text{ and } \eta_i^{n+1} - \eta_{i-1}^{n+1} > \epsilon$$

여기서, D 는 총수심, $n+1$: time step, i 는 격자 번호, D_c 는 임계 수심 깊이(0.1 m), η 는 조위, ϵ 는 임계 해수면 기울기로 0.05 m/cell을 사용하였다. 수치모의에 이용된 격자망은 Fig. 3과 같다.

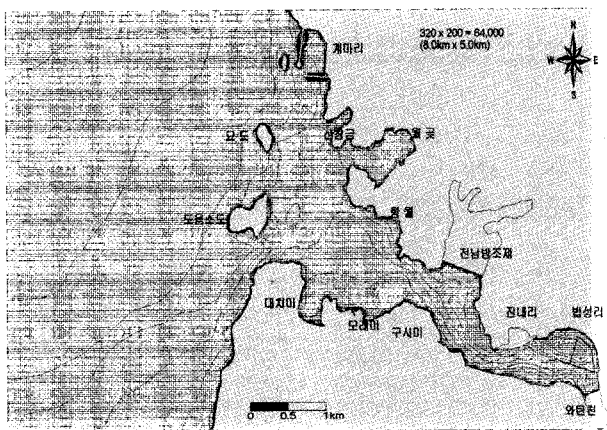


Fig. 3 Grid domain for numerical simulation

3. 조석환경 변화

본 실험에서 설정한 계산영역은 범성포를 포함하여 동서로 8.0km, 남북으로는 5.0km로, 격자간격은 25m 간격의 등격자를 사용하여, x, y 직각좌표계에서 x방향으로 320개, y방향으

로 200개의 격자선으로 구분하여 실험을 수행하였다. 사용된 지형 및 수심자료는 최신의 정보를 담기 위하여 각종 개발계획 자료를 조사·수집하였으며, 공사 진행도도를 판단하여 가장 적절한 지형 및 수심도를 입력하였다. 금회 실험은 2006년 12월의 해양조사 자료를 이용하기 때문에 당시의 범성 진내지구 공사추진상황을 근거로 하여 수행하였다. 대상해역에 있어서 흐름의 특성을 규명하기 위하여 Fig. 3의 정점 P8에서 유속계를 계류하여 15일간(대, 중, 소조기간)에 걸쳐 장기계류관측을 실시하였다. 관측기기는 RCM-9형 자기기록유속계를 사용하였으며, 15일 동안 매 10분 간격으로 유향과 유속을 자기기록하도록 하였다. 관측결과, 관측지점에서의 최대유속은 48.76 cm/sec, 유향은 35.36°으로 나타났고, 평균유속은 17.43 cm/sec로 나타났다. 주된 흐름은 대체로 북동(창조시) 및 남서(낙조시) 방향을 타나내고 있다. 전반적으로 1/2일주조가 1일주조에 비해 크게 나타났고, 조석잔차류는 북동방향으로 2.69 cm/s의 크기로 나타났다. 창조시 최강유속은 48.7 cm/s이며, 낙조시 최강유속은 40.0 cm/s로 나타났다. (Fig. 8)

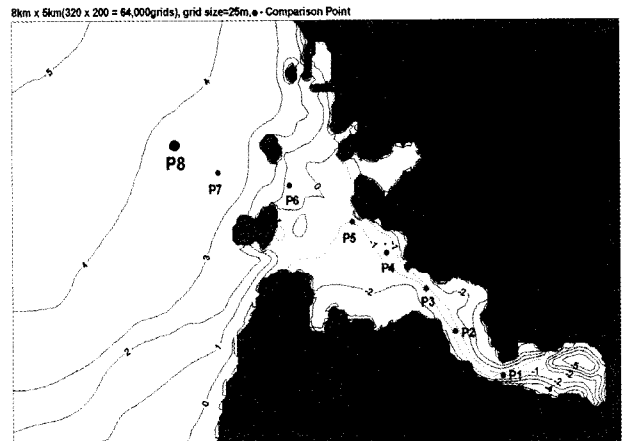


Fig. 4 Calculated domain and comparison point

Fig. 7는 P8지점에서의 유속 분포에 따른 16방위별 출현율을 제시하였다. P8지점에서의 16방위의 유향별 주 방향은 창조시 서쪽 방향과 낙조시 동쪽 방향을 이루고 있으며, 유속의 계급별 출현율은 0~20 cm/s에서 64%를 차지하며, 20~40 cm/s에서 34.8%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 조간대가 발달된 해역에서의 개발에 따른 조석환경 변화 예측실험을 수행하였다. 개발이 진행 중인 해역에 대한 모형을 구축한 후, 이에 대한 검증용 거친 경계조건과 제 조건으로 과거, 즉 개발이 진행되기 전의 상황과 미래, 즉 개발이 완료되는 시점에 대한 상황을 재현하였다.

재현 결과를 바탕으로 Fig. 4에 제시된 계산영역내의 각 지점을 중심으로 개발에 따른 조류유속을 비교·검토하였으며, 이와 병행하여 창,낙조시 지속시간의 변화와 조간대의 증감분포를 확인하였다.

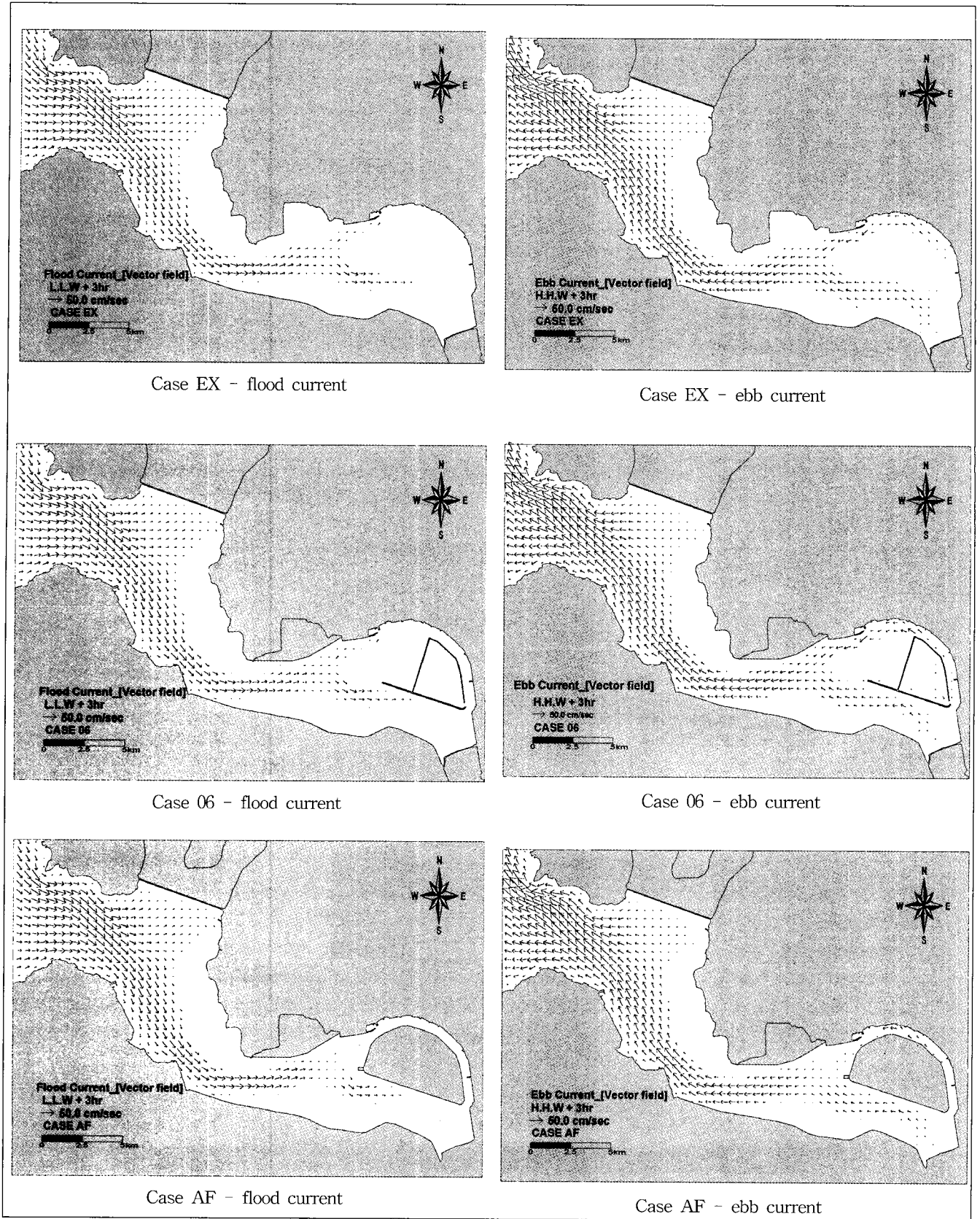


Fig. 5 Comparison of current vector field in the spring tide

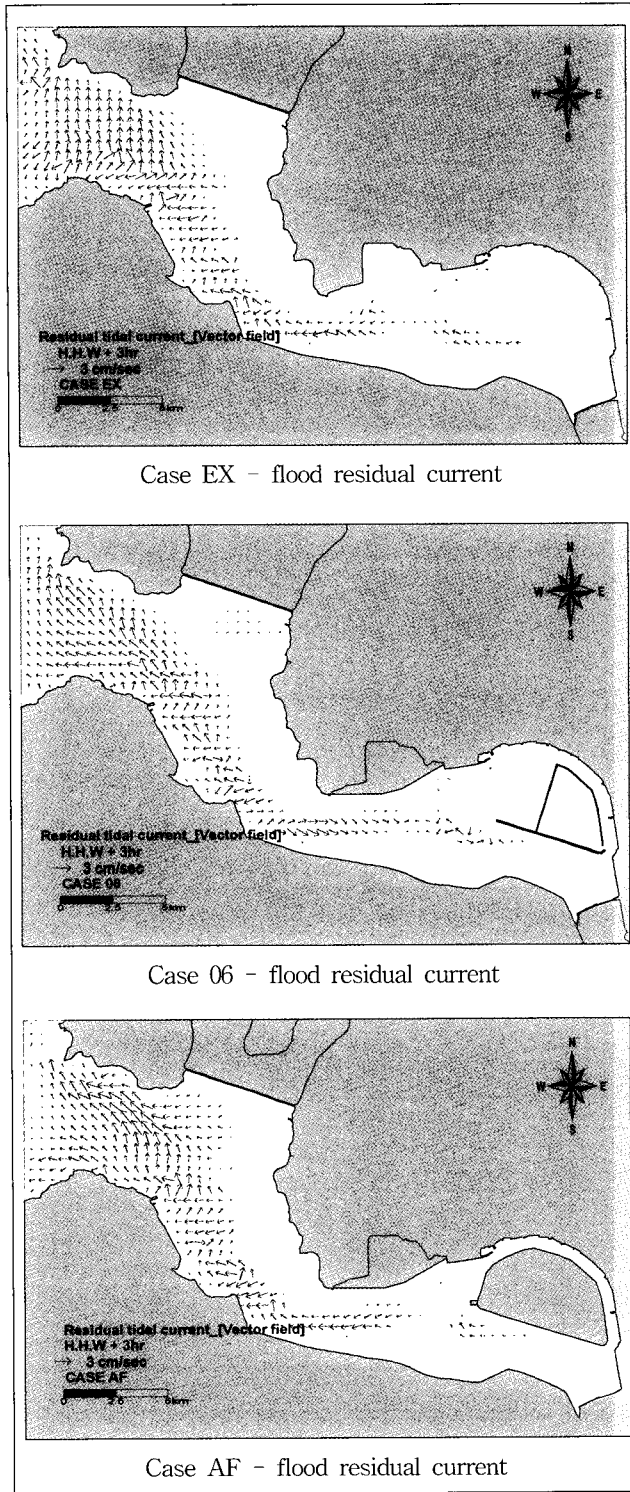


Fig. 6 Comparison of residual tidal current during 15days

Table 3 Continuation time of ebb and flood current in the spring tide [Unit : hr]

Point	Continuation time	CaseEX	Case06	CaseAF
P1	Ebb	8.22	8.20	8.26
	Flood	4.09	4.10	4.04
P2	Ebb	8.08	8.08	8.09
	Flood	4.22	4.22	4.21

P3	Ebb	7.97	7.97	7.97
	Flood	4.33	4.33	4.32
P4	Ebb	7.78	7.79	7.77
	Flood	4.52	4.51	4.52
P5	Ebb	7.40	7.40	7.41
	Flood	4.90	4.90	4.90
P6	Ebb	6.72	6.71	6.71
	Flood	5.58	5.59	5.60
P7	Ebb	6.16	6.16	6.17
	Flood	6.14	6.14	6.14
P8	Ebb	6.16	6.16	6.16
	Flood	6.14	6.14	6.14



Fig. 7 Current vector at P8

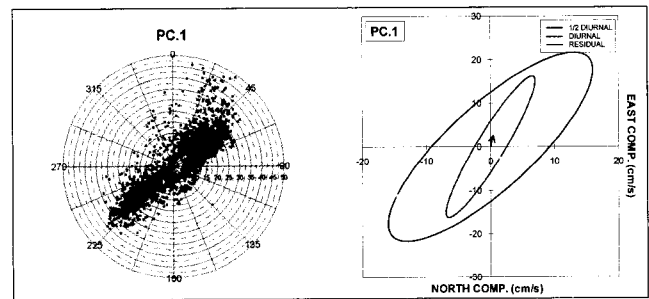


Fig. 8 Current dispersion and current ellipse

각 Case별 창·낙조시 유속벡터도는 Fig. 5에 제시하였다. 제시된 유속벡터도는 P8지점에서의 조위정보를 기준으로 하여 창·낙조류 시점을 추출하였다. 제시된 결과에서 보이는 바와 같이 고·저조후 3시간 후의 창·낙조시의 유속은 Fig. 4에 표기된 (-)1.0m 즉, D.L(+).1.0m 등수심선의 주수로부를 중심으로 형성되고 있으며, 개발영역의 중심으로는 25cm/sec 이하의 유속양상을 보이고 있다. 15일 동안 수치모의 결과를 바탕으로 계산된 조석잔차류 결과를 Fig. 6에 제시하였다. 개발전과 후인 Case EX, AF의 경우 잔차류는 낙조성분이 우세하게 나오나 개발 중인 Case 06의 경우는 창조성분이 다소 우세하게 나오는 것으로 나타났다. 모든 경우에 대한 잔차성분의 크기는 3cm/sec 미만으로 나타났다. 대조시점을 기준으로 개발에 따른 비교정점별 조류속 비교를 Fig. 9에 제시하였다. x축의 (+)방향은 창조, (-)방향은 낙조를 나타낸다. 개발에 따른 가장 큰 변화는 1번에서 4번 정점까지의 창조시 유속 감소와 낙조시 유속 증가에 있다. 이는 개발에 따른 통수단면 및 조랑의 감소가 원인임을 추정할 수 있으며, 그 영향은 4번 정점을 지나면서, 줄어들어 외해 측 8번 정점에서는 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 대조시점을 중심으로 조간대의 변

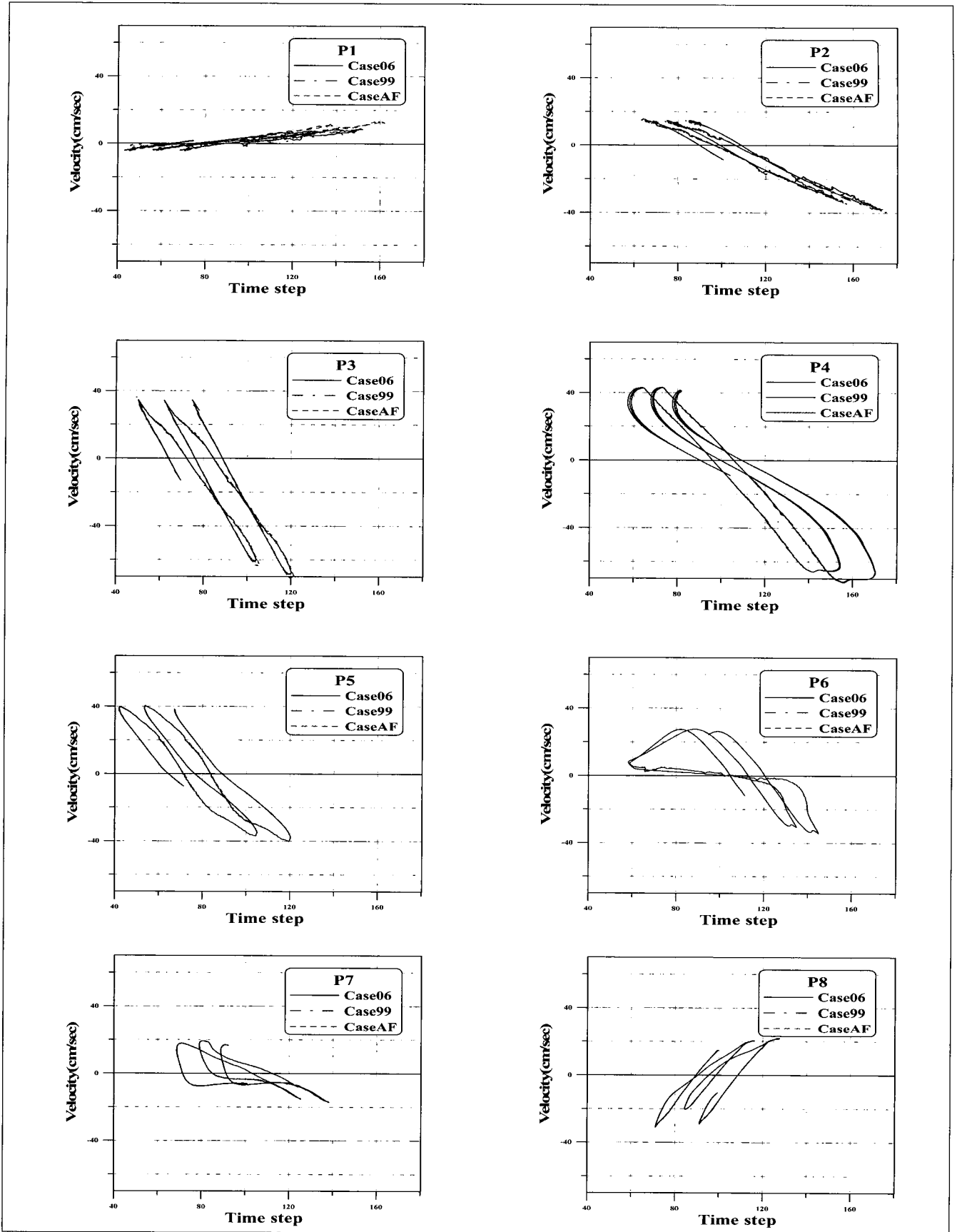


Fig. 9 Velocity comparison in the spring tide

화 양상을 파악하기 위하여 최저조시점 및 고조시점에서의 조간대 격자수를 확인하였다. Table 2에 제시된 결과와 같이, 개발에 따른 영향으로 조간대가 줄어들어 가는 경향을 보이고 있다. 개발이 진행 중인 경우인 Case06의 경우, 개발지역을 제외한 경우는 그대로지만 개발지역을 포함하는 경우 증가하는 것으로 나타나 개발에 따른 개발지역에서의 복잡한 영향을 발생하고 있는 것으로 추론할 수 있다. 또한 개발이 완료된 후 통수 단면적 등의 축소로 인하여 조간대의 양이 줄어들어 가는 것으로 알 수 있다.

일반적으로 조간대가 발달할수록 낙조우세가 심화되는 경향을 보이는데, 법성포 해역의 경우도 낙조의 지속시간이 내안으로 갈수록 커지고 있다. 하지만 외해 쪽으로 갈수록 창·낙조의 지속시간은 균형이 맞춰지고 있다. 개발에 따른 창·낙조시 지속시간 Table 3에 제시하였다. 전반적으로 개발에 따른 낙조시 지속시간은 증가하는 것으로, 창조시 지속시간의 변하는 거의 없는 것으로 나타나 낙조우세(ebb dominance)가 지속되는 것으로 나타났다.

Fig. 9는 개발에 따른 각 지점별 유속의 변화를 나타낸다. 조간대 발달에 따른 낙조우세가 심화됨에 따라 낙조시에 비해 짧은 창조지속시간으로 인해서 유속은 낙조시에 비해 창조시에 상당히 빠른 것으로 나타났다. 창·낙조 유속의 차는 외해로 갈수록 균형을 이루어가는 것을 볼 수 있다. 개발에 따라 약간의 변화는 있었지만 개발 전·후의 유속 패턴은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

4. 결 론

현재 개발이 진행 중인 법성포 해역은 조석의 영향이 탁월할 뿐 아니라 하천 및 인근 방조제의 영향을 받는 소규모 하구 환경을 가지고 있다. 또한, 이러한 영향으로 인하여 잘 발달된 조간대가 유지되고 있다. 본 연구에서는 이러한 특징적 환경을 가지고 있는 법성포 해역을 대상으로 하여 개발에 따른 조석 환경 변화를 예측하였다. 예측을 위하여 사용된 모형은 Flather and Heap(1975)의 조간대 처리기법을 수정하여 사용하였으며, 개발 중에 수행된 해양조사 자료를 기초로 하여 모형의 경계조건 및 제조조건 등을 시행착오를 거쳐 수립하였다. 검증 과정을 거친 모형에 대하여 개발전(Case EX), 개발중(Case 06), 개발후(Case AF)의 실험안으로 나누어 개발에 따른 조석 환경 변화를 예측하였다. 법성포 해역에 대한 조석 환경 현황 및 예측결과를 요약하면 다음과 같다.

- ① 법성포 해역은 일반적으로 조간대가 발달한 해역에서 나타나는 낙조우세 현상이 나타나고 있다.
- ② 개발에 따라 낙조우세 즉, 낙조시 지속시간이 내안쪽으로 갈수록 심화되고 외해쪽으로 갈수록 약화된다.

③ 최강 창·낙조시 유속은 조간대로 드러나는 부분을 제외한 주수로부를 중심으로 나타나고 있으며 개발영역에서 25cm/sec이하의 유속분포를 나타내고 있다.

④ 개발에 따른 통수단면 및 조랑의 감소로 인하여 창조시는 유속증가가, 낙조시는 유속감소가 나타난다.

⑤ 전반적으로 개발에 따라 조간대가 줄어들어 가는 경향을 나타내고 있다.

이상의 결과는 법성포 해역의 조석 환경 영향에 대한 부분을 중점으로 하여 실험을 수행하였으나, 법성포 해역은 와탄천과 전남방조제 등에 의한 홍수시의 수위 변동에 따른 계절적 영향이 크고, 이에 따른 소류사와 부유사에 의해 큰 영향을 받는 퇴적물 이동 실험이 동반 수행되어야 할 것으로 판단된다. 나아가, 이를 위한 기초자료의 수집·분석이 축적되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 김강민, 이종우, 금동호, 전성환(2006), "부산북항 재개발에 따른 유동장 및 해수교환 변화 모의", 한국항해항만학회지 30권 10호, pp. 861-867.
- [2] Mellor, G. L.(1998), "User Guide for A Three-Dimensional", Primitive Equation, Numerical Ocean Model, Program in Atmospheric and Oceanic Sciences Princeton University.
- [3] Pritchard, D., Hogg, A. J. and Roberts, W.(2002), "Morphological modelling of intertidal mudflats: the role of cross-shore tidal currents". Continental Shelf Research, 22, pp.1887-1895.
- [4] Stelling, G. S., Wiersma, A. K. and Willemse, J. B. T. M.(1986), "Practical aspects of accurate tidal computation", J. of Hydraulic Eng., ASCE, Vol. 112, No. 9, pp.802-817.
- [5] Falconer, R. A. and Owens, P. H.(1987), "Numerical simulation of flooding and drying in a depth-averaged tidal flow model", Proc. Ins. Civ. Eng., Part 2, Vol. 83, pp.161-180.
- [6] Flather, R. A. and Heaps, N. S.(1975), "Tidal computations for Morecambe Bay", Geophys. J. R. Astro. Soc., 42, pp.489-517.

원고접수일 : 2007년 4월 6일

원고채택일 : 2007년 10월 25일