

3차원 수치모델을 이용한 제주항내 유속분포 특성 (II)

- 월별 잔차류 특성 -

조은일·이병걸*

제주대학교 환경공학과, *제주대학교 해양토목공학과

The Characteristics of Current Distribution Using Three-Dimensional Hydrodynamic Model in Jeju Harbor (II)

- the characteristics of residual current -

Eun-Il Cho and Byung-Gul Lee*

Department of Environmental Engineering, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea

**Department of Ocean Civil Engineering, Cheju National University, Jeju-Do, 690-756, Korea*

The residual current was calculated using three-dimensional hydrodynamic model during July, August and November in 2000. The current was forced by temperature, salinity, density and tidal current. The current variations of July, August and November show that the residual current of August are the strongest among three months. It can be explained that the density effect can be important role in residual current at Jeju Harbor. The residual current is strong at entrance of the harbor since the geometric change is strong. Finally we conclude that the residual current at Jeju Harbor can be controlled by geometric and density conditions.

Key words : residual current, three-dimensional hydrodynamic model, tidal current, density, Jeju Harbor

서론

잔차류는 일반적으로 바람, 담수량, 외해로부터의 흐름, 그리고 조류의 비선형성에 의하여 발생된다. 즉 연안역에서의 잔차류란 비주기적인 유동을 잔차류라고 보고있다. 잔차류는 연안역에서 장기적인 물질수송과 직접적인 관련이 있기 때문에 연안역에서 잔차류의 특성을 파악하는 것은 매우 중요한 일이다. 잔차류의 이런 특성으로 물질수송 특성을 파악하기 위하여 많은 연구자들이 물질확산 시뮬레이션할 때 잔차류를 이용하였다. 최 (1994)는 진해만에서 빈산소

수괴 형성에 관한 연구에 있어 유입되는 오염물질의 확산을 잔차류를 이용하여 규명하였고, 金 (1994)은 진해만에서 하계 부영양화 모델링을 수행하면서 잔차류를 이용하였고, 또한 趙 (1996)는 생태계 모델을 이용하여 가막만의 환경용량을 산정할 때 이를 이용하였다.

연적으로 평균된 2차원 모델을 통한 조석잔차류에 관한 연구는 과거 10년 동안 광범위하게 연구되어져 왔다. Tee (1976)와 Oonishi (1977)는 좁은 수로와 연결된 지역에서 발생하는 뚜렷한 잔차류 에디 (residual eddies)에 대하여 보고한 바가 있고, 이러한 잔차류는 수리모형이나 관측에 의해서 증명된 바도 있다 (Caponi, 1977 :

Yanangi, 1980). 또한 Greenberg (1983)와 Isaji et al. (1984)은 해저 구릉이나 구부러진 해안선에 의해 강한 잔차류가 발생하는 것을 제시한 바가 있다. 그 외에도 Huthnance (1973), Tee (1977) 그리고 Zimmerman (1978)에 의해 해저지형의 변화에 따른 잔차류의 이론적, 수치적인 연구가 보고되었다.

본 연구에서는 항만 내의 물질이나 오염물질 혹은 하천유입에 따른 확산변동에 직접적인 영향을 주는 잔차류의 특성을 파악하기 위하여 제주시에 위치하고 있는 제주항 내의 잔차류를 3차원 수치모델을 이용하여 계산해보고자 한다.

자료 및 방법

대상해역

제주항은 수많은 선박의 입·출입과 산지천에서 나오는 하천 오염물질로 인하여 수질오염이 쉽게 발생

될 수 있는 해역이다.

본 연구에서는 이러한 항만내의 잔차류를 표층뿐만 아니라 저층에서의 물질이동을 보다 명확히 파악하기 위하여 항만의 수심을 3개의 층으로 나누어서 각 층별의 잔차류를 계산해 보고자 한다. 또한 계절별 (하계, 추계) 변동특성을 파악하기 위하여 2000년 7월, 8월 그리고 11월에 관측된 수온, 염분 그리고 밀도값을 적용하여 월별 및 계절별 (하계, 추계) 잔차류의 특성을 파악하고 하였다.

3차원 수치모델을 이용한 잔차류 특성을 조사하기 위한 제주항의 위치는 Fig. 1에 나타내었다. 제주항은 제주도의 북부중앙에 위치하고 있으며, 개항장이고 제 1종 지정항만으로서 제주도에서 제일 큰 항구이다. 항만의 경계는 서방파제 첨단 1 km에서 사라봉 동단과 화북포구 서단 중단을 연결한 선내로서 항내 수면적은 $7.904 \times 10^6 \text{ m}^2$, 임해지구 면적은 4.404 m^2 , 항내수심은 1.5~14.3 m이다. 조류는 연안에 병행하여 흐르고 평균 유속은 1.4 노트 내외이며 창조류는 서쪽으로 낙조류는 동쪽으로 흐른다. 년 최고 조차는 2.94 m

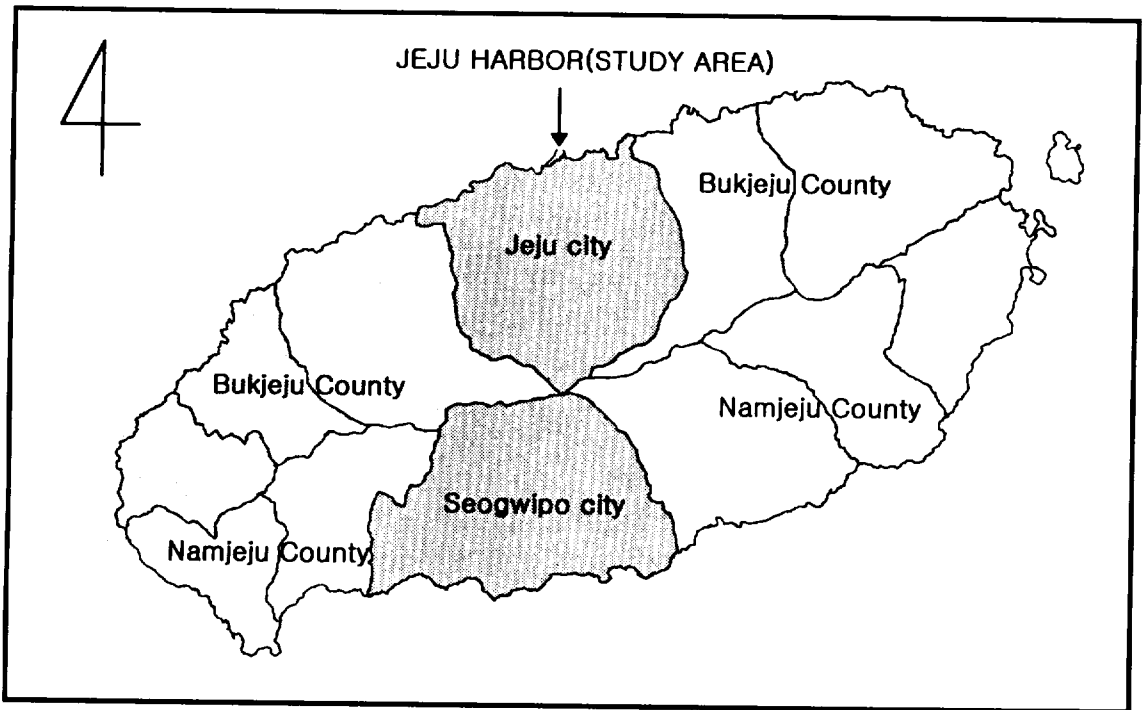


Fig. 1. Location of the study area in Jeju Island.

이고 년간 표층 수온의 범위는 13.0~26.4°C이다 (國立環境研究院, 1991 : 제주도, 1994 : 제주도, 1997b).

3차원 모델의 구성

기본방정식

본 수치 모델은 내만 및 하구에서 유체의 운동을 정식화한 운동방정식, 연속방정식, 조위의 변화를 정식화한 방정식, 염소량 확산 방정식, 열 (수온)의 확산 방정식 및 해수의 밀도와 염소량, 수온과의 관계를 정식화한 상태방정식으로 구성된다. 모델을 정식화하기 위한 좌표계는 Fig. 2에 나타내었고, 평균해면 상에 x-y를 취하고 연직상향에 z축을 가지고 있다.

본 연구에서 사용된 방정식은 x, y, z방향의 운동방

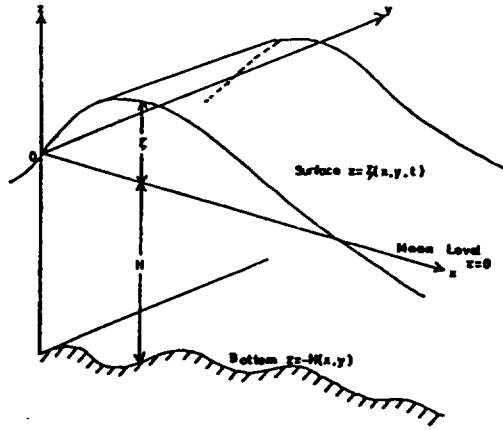


Fig. 2. Cartesian coordinate for a three-dimensional hydrodynamic model.

Table 1. Input data for three-dimensional hydrodynamic model

Parameter	Input Value
Total mesh value	$75 \times 89 \times 3 = 20.025$
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 25 \text{ m}$
Water depth	chart datum + MSL
Time interval	5sec
Level	S : 0 ~ 3 m M : 3 ~ 6 m B : below 6 m
Tidal level and degree at open boundary	A : 69.7 cm. 304.1 ° B : 69.7 cm. 304.1 °
Water temp. and chlorinity at open boundary	S : Table 2 M : Table 2 B : Table 2
Coriolis coefficient	$f = 2 w \sin \phi$
Surface friction coefficient	0.0013
Internal friction coefficient	0.0013
Bottom friction coefficient	0.0025
Horizontal viscosity coefficient	$1.0E5 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
Horizontal diffusion coefficient	$1.0E5 \text{ (cm}^2/\text{s)}$
Calculation time	5 tidal cycle

Table 2. Water temperature and chlorinity at open boundary in 2000

Month	Cl (‰)			Temp (°C)		
	S	M	B	S	M	B
July	17.51	17.51	17.51	22.8	21.8	21.6
August	15.89	16.05	16.05	25.7	25.1	25.0
November	18.43	18.43	18.43	19.0	19.0	19.0

Table 3. Initial condition at Jeju Harbor and flowrate and temp. at Sanzi River

Month	Level	Temp (°C)	Sal (‰)	Cl (‰)	Sanzi River	
					Flowrate (m ³ /d)	Temp (°C)
July.	S	25.2	29.4	16.26	69,465.6	19.2
	M	22.3	30.8	17.05		
	B	21.1	31.5	17.44		
Aug.	S	27.7	27.6	15.28	77,760.0	20.1
	M	25.8	28.8	15.94		
	B	24.7	29.4	16.27		
Nov.	S	18.6	32.1	17.2	46,656.6	15.4
	M	18.8	33.1	17.8		
	B	19.0	33.3	17.9		

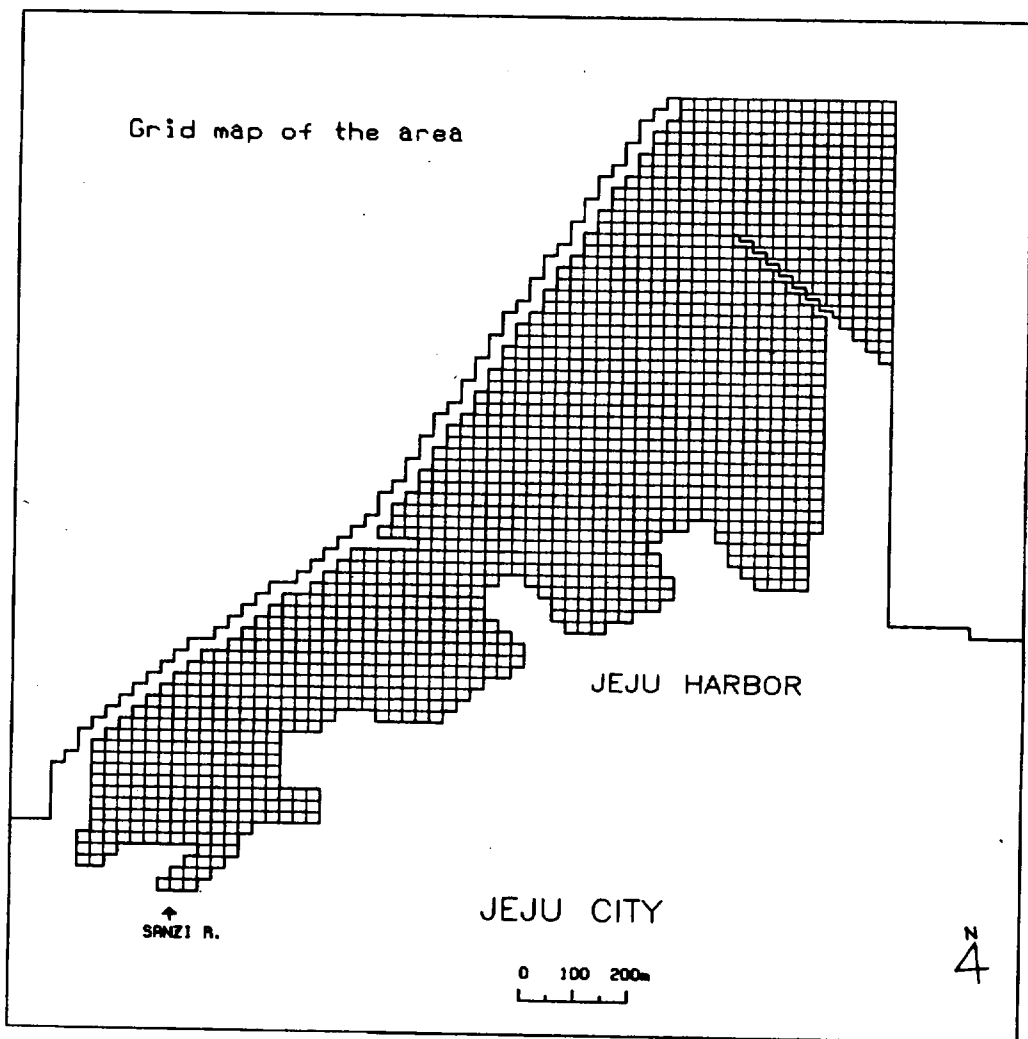


Fig. 3. Finite-difference grid of Jeju harbor.

정식, 연속방정식, 자유표면 방정식, 염소량 수지식, 열 수지식 및 해수의 밀도를 염소량과 수온과의 관계로 표현한 상태방정식으로 구성된다. 그리고 잔차류는 다음의 공식을 이용하여 계산하였다.

$$U_{res} = U_{residual} = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} (U_{tidal} + U_{density}) dt$$

여기서 $U_{residual}$ 은 잔차류이고, U_{tidal} 은 조류, $U_{density}$ 는 밀도류를 나타낸다. 여기서 t_2 와 t_1 은 한조석주기 동안의 시간을 말한다.

경계조건

월별 잔차류의 특성을 파악하기 위하여 각 상태량에 대해서 적절한 경계조건을 설정하는 것이 필요하다. 제주항을 시뮬레이션하기 위해 해수유동모델의 입력 자료는 Table 1, Table 2 그리고 Table 3에 나타내었다. Table 1을 보면 경계에서의 조위는 반일주 조성분인 M_2 분조를 사용하였으며 바람의 영향은 없는 것으로 가정하였다. X, Y방향의 격자 크기는 각각 25 m로 하였으며 전체격자는 $75 \times 89 \times 3$ 층으로 구성하였다. Table 2와 Table 3에는 월별 경계조건과 초기조건 그리고 하천자료를 나타내었다. 경계조건은 항만 입구에서 월별 조사된 수온과 염소량을 각 층별로 조사된 값을 입력하였고, 초기조건은 항내 4개 조사지점의 값을 층별로 평균하여 입력하였다. 그리고 산지천 유량은 동 조사시기에 실측한 유량과 수온을 입력하여 나타내었으며 표층에서 유입되는 것을 조건으로 하였다. 또한 본 연구에서 시뮬레이션한 모델 계산 영역은 Fig. 3에 나타내었다.

결과 및 고찰

3차원 수치모델의 적용성 검토

3차원 수치모델의 적용성을 검토하기 위하여 Fig. 4에 관측치와 계산치를 비교하여 나타내었다. 관측치는 제주시 (2000)가 1999년 8월에 조사한 창조류의 유속이다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 만의 중앙부에서는 약간의 유향의 차이를 보였으나 유속의 크기는

전반적으로 관측치와 계산치가 잘 일치됨을 알 수 있다. 따라서 본 모델에서 제시된 결과는 제주항내의 유속분포를 잘 나타내고 있다고 사료된다.

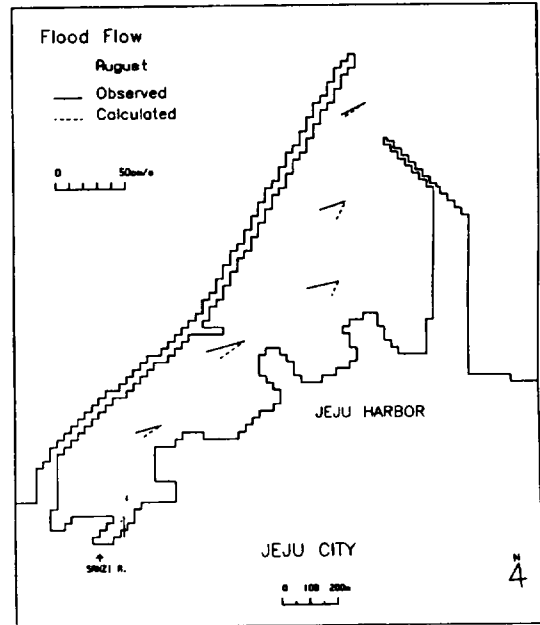


Fig. 4. Comparison of tidal current between calculated and observed results.

월별 표층과 저층 잔차류의 분포특성

2000년 7월의 잔차류 분포는 층별로 Fig. 5 - 7에 나타내었다.

Fig. 5는 7월의 표층에서의 잔차류 분포를 나타내었다. 잔차류 패턴을 보면 항만 입구부에는 강한 와류가 발생되는데 이것은 주로 유속이 강하게 작용하는 조석류의 비선형성분에 의하여 발생된 것으로 사료된다. 또한 항만의 중앙부에 방파제로 인하여 좁아지는 해역에서도 약간의 와류가 발생되고 있음을 알 수 있다. 그리고 산지천이 위치하고 있는 항만 안쪽 부근에는 약간의 강한 잔차류가 나타나고 있다. 이러한 결과를 볼 때 잔차류는 지형이 갑자기 바뀌는 해역과 밀도가 강하게 형성될 수 있는 해역에 잘 발생될 수 있음을 보여준다. Fig. 6은 7월의 중층에서의 잔차류 분포를 나타내었다. 잔차류 패턴을 보면 표층에서와 마찬가지로 항만의 입구부에서 강한 잔차류의

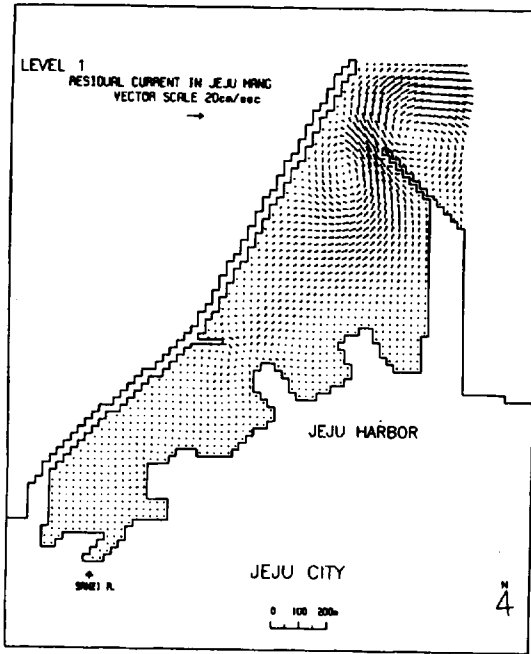


Fig. 5. Distribution of computed residual currents at 1st level in July, 2000.

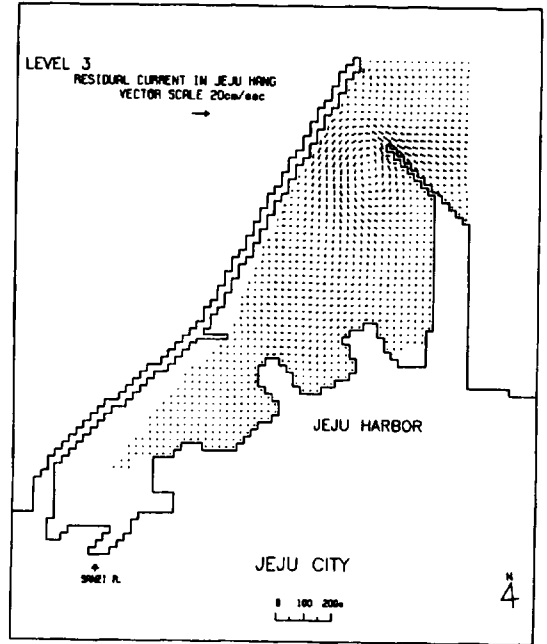


Fig. 7. Distribution of computed residual currents at 3rd level in July, 2000.

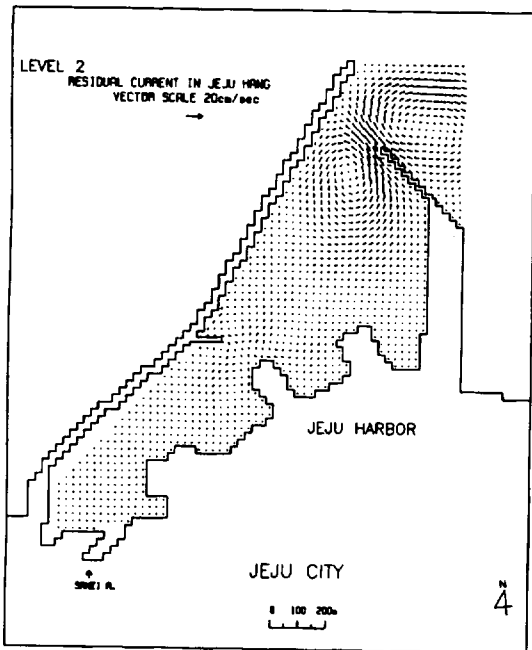


Fig. 6. Distribution of computed residual currents at 2nd level in July, 2000.

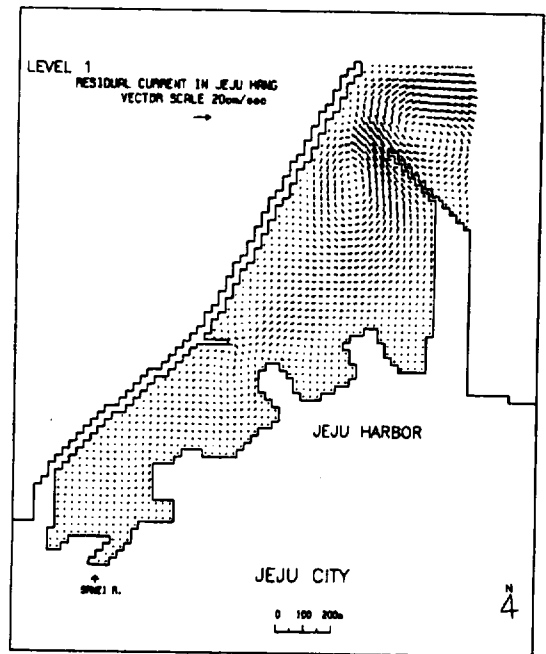


Fig. 8. Distribution of computed residual currents at 1st level in August, 2000.

3차원 수치모델을 이용한 제주항내 유속분포 특성 (II)

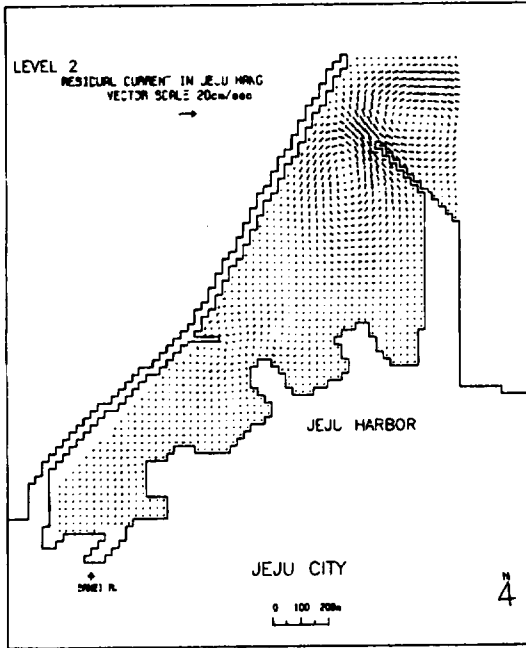


Fig. 9. Distribution of computed residual currents at 2nd in August, 2000.

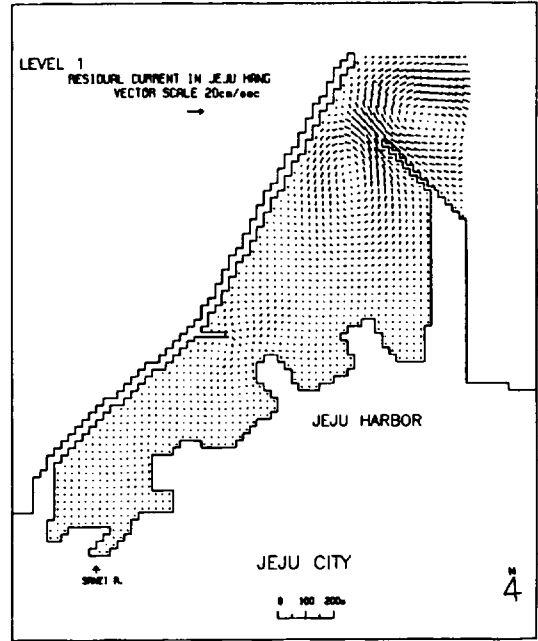


Fig. 11. Distribution of computed residual currents at 1st level in November, 2000.

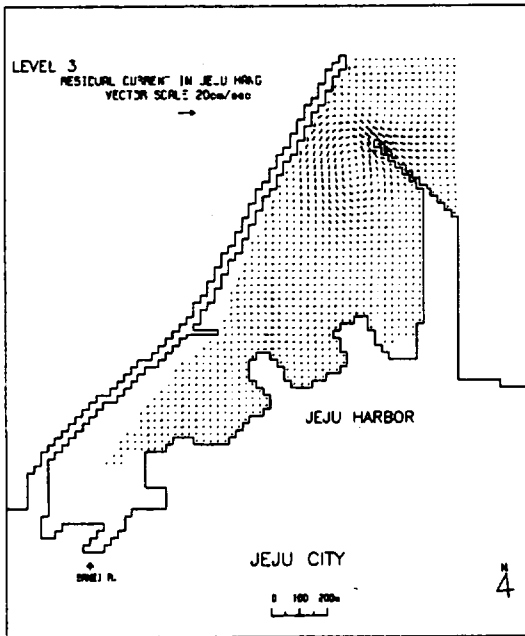


Fig. 10. Distribution of computed residual currents at 3rd level in August, 2000.

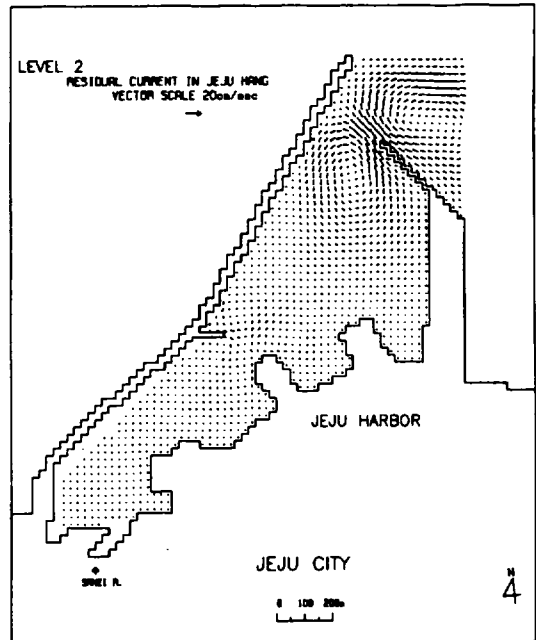


Fig. 12. Distribution of computed residual currents at 2nd level in November, 2000.

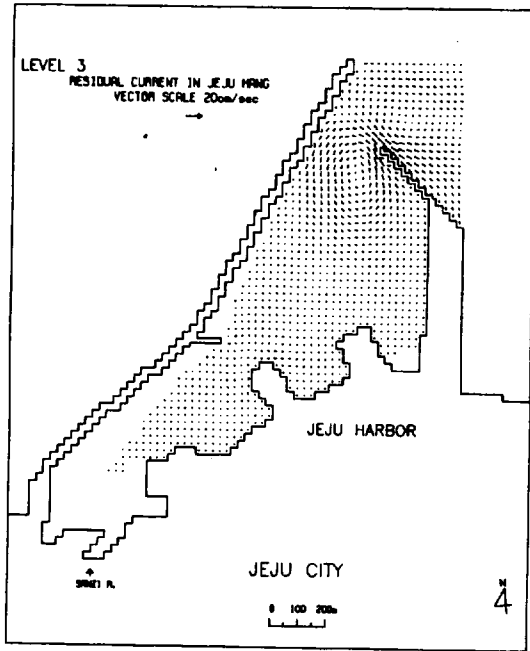


Fig. 13. Distribution of computed residual currents at 3rd level in November, 2000.

특성을 보여주고 있으며 또한 표층과 마찬가지로 중층에도 약간의 와류를 보여주고 있다. 이에 비해 산지천 부근은 잔차류가 거의 나타나지 않고 있음을 알 수 있다. 따라서 밀도류에 의해 발생할 수 있는 잔차류는 표층에 상당히 국한되어 나타남을 알 수 있다. Fig. 7은 7월의 저층에서의 잔차류의 특성을 보여주고 있다. 잔차류 패턴을 보면 표층이나 중층에 보듯 항만의 입구부에는 여전히 상대적으로 강한 잔차류를 보여주고 있으나 중층에서 보여주었던 항만 중앙부의 잔차류는 나타나지 않고 있다. 따라서 제주항 내에서의 잔차류는 지형적인 효과에 의한 잔차류가 매우 강하게 나타남을 알 수 있다.

8월의 잔차류 분포는 층별로 Fig. 8 - 10에 나타내었다.

Fig. 8은 8월의 표층의 잔차류 패턴을 보여주고 있다. 이 그림도 7월의 표층 잔차류와 비슷한 양상을 보여주고 있지만 7월에 비하여 약간 강하게 나타나는데 이러한 결과는 7월보다 8월에 산지천의 유량이 많고 상대적으로 강한 성층이 생성됨으로 해서 잔차류 패턴이 상대적으로 밀도류의 영향을 많이 받아서 이

러한 결과가 나온 것으로 사료된다. Fig. 9는 8월의 중층의 잔차류 패턴을 나타내었다. 이 그림도 7월의 중층의 잔차류보다 상대적으로 강하게 나왔으며 이러한 결과는 밀도류가 중층까지 영향을 주고 있음을 알 수 있다. Fig. 10은 저층의 잔차류 분포를 나타낸 것으로 이 경우는 상대적으로 잔차류가 매우 감소되고 있음을 알 수 있으며 저층에서 밀도류의 효과는 매우 적게 나타남을 알 수 있다.

11월의 잔차류 분포는 층별로 Fig. 11 - 13에 나타내었다.

Fig. 11은 11월의 표층 잔차류 분포를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 7월과 8월에 비하여 잔차류가 매우 약하게 나타남을 알 수 있으나 전반적인 잔차류의 형태는 7월과 8월과 유사한 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 11월의 경우, 산지천으로 부터의 담수의 유입이 적고 수온이 표층과 저층에 걸쳐 거의 유사하므로 밀도류의 세기가 상대적으로 약해 이와 같이 발생된 것으로 사료된다. 이러한 경향은 Fig. 12의 중층에서도 거의 비슷한 양상을 보여주고 있으며 Fig. 13의 저층의 잔차류 패턴은 7월과 8월의 잔차류 패턴과 유사하게 나타났다.

이상의 결과를 보면, 제주항의 경우 지형변화와 밀도류에 의하여 잔차류의 형태와 세기가 달라질 수 있음을 알 수 있으며, 특히 잔차류의 월별변동은 주로 밀도류에 의하여 나타남을 알 수 있었다.

요 약

제주항내의 물질이나 오염물질 혹은 하천유입에 따른 확산변동에 직접적인 영향을 주는 잔차류의 특성을 파악하기 위하여 3차원 수치모델을 이용하여 3개의 층으로 나누어 2000년 계절별 (하계, 추계) 잔차류의 변동 특성을 조사한 결과는 다음과 같다.

3차원 수치모델을 시뮬레이션한 결과, 만의 중앙부에서는 약간의 유향의 차이를 보였으나 유속의 크기는 전반적으로 관측치와 계산치가 잘 일치됨을 알 수 있다. 7월의 잔차류 분포를 보면 표층인 경우, 항만 입구부와 중앙부에 강한 와류가 발생되고 있으며 이러한 결과를 볼 때 잔차류는 지형이 갑자기 바뀌는

해역과 밀도가 강하게 형성될 수 있는 해역에 잘 발생될 수 있음 알 수 있었으며 밀도류에 의해 발생될 수 있는 잔차류는 표층에 상당히 국한되어 있음을 알 수 있었다. 산지천의 유량이 많아지는 8월의 잔차류 패턴을 보면 7월에 비해 강하게 나타남을 알 수 있으며 그 영향은 중층까지 영향을 주고 있음을 알 수 있었다. 11월의 경우는 7월과 8월에 비하여 잔차류가 약하게 나타나고 있었으며 전반적인 잔차류의 형태는 유사한 것을 알 수 있었다.

이상의 결과를 보면, 제주항의 경우 지형변화와 밀도류에 의하여 잔차류의 형태와 세기가 달라질 수 있음을 알 수 있으며, 특히 잔차류의 월별변동은 주로 밀도류에 의하여 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

- 國立環境研究院. 1991. 全國 主要沿岸 流入汚染負荷量 算定에 關한 調査研究. 71 pp.
- 金鍾九. 1994. 鎭海灣 海域의 夏季 富營養化 모델링. 釜山水產大學校 博士學位論文. pp. 1-130.
- 濟州道. 1994. 濟州道 綜合開發計劃. p. 531.
- 제주도. 1997a. 환경백서. p. 42.
- 제주도. 1997b. 제주도 친환경개발을 위한 환경지표설정. p. 238.
- 제주시. 2000. 산지천 정비 기본 및 실시설계 종합보고서. p. 485.
- 趙恩一. 1996. 生態系모델을 이용한 漁場環境容量 算定. 釜山水產大學校 博士學位論文. 139 pp.
- 최우정 · 박청길 · 이석모. 1994. 진해만의 빈산소수괴 형성에 관한 수치실험. 한국수산학회지. 27: 413-433.
- Caponi. E.A. 1977. The simulation of estuarine circulation with a fully three-dimensional numerical model. In Estuarine Processes. Wiley. M., (ed.) Vol. 2. Academic Press. New York. 322 pp.
- Greenberg. D.A. 1983. Modelling the mean barotropic circulation in the Bay of Fundy and Gulf of Maine. J. Phys. Oceanogr., 13: 886-904.
- Isaji. T. and M.L. Spaulding. 1984. A model of the tidally induced residual circulation in the Gulf of Maine and Georges Banks. J. Phys. Oceanogr., 14: 1119-1126.
- Huthnance. J.M. 1973. Tidal current asymmetric over the Norfolk sandbanks. Estuarine and Coastal Marine Science, 1: 89-899.
- Oonishi. Y. 1977. A numerical study on the tidal residual flow. J. Oceanogr. Soc., Japan. 33: 207-218.
- Tee. K.T. 1976. Tide-induced residual current. A 2-D nonlinear numerical tidal model. J. Mar. Res., 34: 603-628.
- Yanagi. T. 1980. Variability of the constant flow in Osaka Bay. J. Oceanogr. Soc. Japan. 36: 246-252.
- Zimmerman. J.T.F. 1978. Topographic generation of residual circulation by oscillatory (tidal) currents. Geophys. Astrophys. Fluid Dynamics. 11: 35-47.