3차원 해수유동모델에 의한 제주항 연안해역의 해수순환 특성

양태혁 · 양성기*

제주대학교 토목공학과-해양과 환경연구소

(2010년 10월 23일 접수; 2011년 4월 11일 수정; 2011년 4월 22일 채택)

The Characteristics of Circulation in the Coastal Area of Jeju Harbor Using the Three Dimensional Ocean Circulation Model

Tai-Hoek Yang, Sung-Kee Yang*

Department of civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

(Manuscript received 23 October, 2010; revised 11 April, 2011; accepted 22 April, 2011)

Abstract

The characteristics of circulation in the coastal area of Jeju Harbor in Korea was examined using the Princeton Ocean Model(POM) with a sigma coordinate system. The result of numerical analysis well corresponded to the observed current data. The velocity at offshore was stronger compared to coastal area during the both period of in maximum flood and maximum ebb of spring tide. According to mean wind velocity, the tidal velocity at the shallow area of Jocheon was slightly increasing during maximum ebb. The effect of wind on the circulation was stronger in shallow area and showed rapid change with depth.

Key Words : POM, Oceanic current, Sigma coordinate system, Bottom topography

1. 서론

사면이 바다로 둘러싸인 제주도는 해상기상관측 부위와 같은 역할을 수행할 수 있는 천혜의 해역에 위치하며, 탁월한 해륙풍과 계절풍의 영향으로 천기의 변화가 심한 도서지역이다(양 등, 1995). 하절기에는 상습적인 태풍의 통과지대에 위치하는 지리적인 조건으로 인해 고조와 해일, 집중호우와 침수 등의 자연재해가 발생하며, 동절기에는 북서 계절풍에 의한 폭풍과 해안침식, 월파, 표사이동 등이 현상이 발생하는 등

자연조건이 매우 가혹한 편이다(양과 최, 1999).

제주도 북부 중앙부해역은 국제자유도시의 거점 항만인 제주의항을 중심으로 하여 동쪽으로 화북항, 서쪽으로는 외도항을 포함하고 있다. 또한, 연안역을 중심으로 한 해양관광단지의 개발과 항만건설사업 등이 활발하게 진행되고 있으며 최근 계속되는 태풍해일의 피해로 인하여 해양환경변화 및 재해에 대한 관심이 집중되고 있다(강, 1999).

연안해역의 해수유동과 순환은 조석에 의한 조류와 하천 유출수, 외양역을 흐르는 해류와 밀도류, 바람에 의한 취송류 등에 의하여 지배되며, 해안선 및 해저 지형 등에 의하여 매우 복잡하고 비정상적인 유동양상으로 나타날 수도 있다(강, 1999; 윤, 2003). 따라서 이 해역은 계속적인 항만개발로 인하여 연안역의 해

*Corresponding author : Sung-Kee Yang, Department of Civil Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea
Phone : +82-64-754-3451
E-mail: skyang@jejunu.ac.kr

수유동에 인위적인 변화를 가져왔으며, 이로 인한 해양환경의 변화와 재해가 문제시되고 있는 실정이다. 이 같은 연안해역의 물리해황 및 수질환경을 예측하기 위해서는 정확한 연안해역의 유동현상재현에 대한 연구조사가 필수적이다. 이러한 연구는 제주항 및 인근해역의 항만이나 해양관광단지 및 연안해역 개발시 기본계획 수립이나 실시설계시 해수유동의 변화로 예상되는 해양환경의 영향을 분석하는데 기초 자료로 활용될 수 있다.

3차원 해양순환모델(Princeton Ocean Model, POM)은 연직혼합계수를 산정하기 위하여 2차 난류종결모델을 이용하고 있으며, α -좌표계를 도입하고 있다. 또한 'Arakawa C' 격자체계를 도입하고 있으며, 수평시간차분은 양해법(explicit)으로 연직시간차분은 음해법(implicit)으로 풀고 있으며, 자유표면과 시간스텝분리를 이용하며, 열역학방정식을 만족하고 있다. 상기와 같은 특징으로 인하여 이 모델은 수많은 연구자들에 의해 현재 해양대순환 및 연안해양순환에 관한 연구에서 많은 연구성과를 보이고 있다.

이러한 해수유동연구에 사용되고 있는 3차원 해양순환모델(Princeton Ocean Model, POM)에 관한 연구는 시그마 좌표계에서 자유수면을 고려할 수 있는 모델을 개발하여 미국 북부 California 해안에서의 용승류와 동안경계류(eastern boundary current)를 계산하여 모델의 효율성을 입증하였다(Blumberg와 Mellor, 1987). 또한, Chesapeake Bay에서의 조석재현과 미국 연안의 중·남부 Atlantic Bight와 멕시코의 대순환 연구 등이 있다(Blumberg, 1975). 쓰시마난류에 대하여 연직방향 26개층, 수평방향 격자간격은 10km의 해상도를 가지는 POM을 동해에 적용하여 그 연직순환구조를 수치모의 하였다(Christopher 등, 1997).

황해 및 동해전역을 포함한 북서태평양을 대상으로 하는 영역에 적용(KEY 모델)하여 쿠로시오 해류가 미치는 각 해역의 유동 특성 및 수온·염분장에 대한 계절적 분포에 대하여 연구와, 득량만에 적용하여 M2분조를 고려한 수온 및 속도장의 반응에 대하여 연구 및 하계에 황해로 유입되는 양자강 하천수 Plume의 확산 거동해석을 모의하였다(박, 1997).

이 연구에서는 제주외항을 포함한 연안해역에서 장기간 관측된 해조류자료와 해수유동의 자료를 분석

하여 시공간적인 해류계의 특성 및 해수유동의 구조를 파악하고자 한다. 이를 위해 그 첫 단계로서 제주외항공사 및 내항의 어항 분구공사가 수행되기 이전 제주항 부근의 해역을 연구대상으로 해조류관측과 POM모형을 이용한 수치해석을 실시하여 해수순환의 기구를 규명하고자 한다.

2. 자료 및 방법

2.1. 조위관측 자료 및 해수유동 조사

제주항 부근의 연구대상해역과 해조류관측점의 위치를 Fig. 1의 측점 P1~P5에 나타내었다. 제주항 부근해역의 해수유동에 미치는 바람의 영향을 파악하기 위해 제주기상청에서 관측한 30년(1971-2000)간의 월별평균 풍속자료를 사용하였으며, 풍향은 30년간의 풍향 자료를 36방위로 빈도분석을 실시하여 동계와 하계의 자료로 구분하여 해석하였다. 조석주기에 따른 연속적인 유황의 변화 상태를 파악하기 위하여 유속계 RCM-7(Aandderra사)에 의한 4개 정점(P1~P2, P4~P5)의 관측자료(NORI)를 사용하였다. 또한 제주외항에 위치한 관측점 P3는 Iotech사의 해상관측시스템(Baytech사)을 설치하여 장기간 최대파주기, 유의파고, 유의파주기, 유속, 유향, 파향, 수온을 관측하였다. 본 연구에서는 조위, 유속 및 유향자료를 사용하여 해조류의 특성을 분석하였다. 이들 자료는 해수유동 및 해수순환의 기구를 규명하기 위해 수행된 3차원 수치해석시 입력 및 검증자료로 사용되었다.

Fig. 1. Research area and observation points(depth in meter).

2.2. 해양순환모델(Princeton Ocean Model, POM) 계산 격자망

본 연구를 위한 계산영역이 동쪽은 조천리로부터 서쪽으로 도두동까지를 경계역으로 두고, 제주항을 중심으로 계산격자망을 구성하였다. 격자간격을 계산 영역 규모에 적절한 Δx , Δy 를 각각 500 m로 정하였다. 계산격자망은 x방향인 동서방향으로 105개의 격자와 y방향인 남북방향으로 75개의 격자망을 갖춘 52.5 km $\times$ 37.5 km의 영역으로 구성하였다. 연직방향의 격자분할은 4개의 층으로 등분하여($\Delta\sigma=0.2$)하였다. 수심도 및 해저지형도의 작성은 국토해양부 국립해양조사원에서 발행한 제주도 부근 및 제주 외항의 수치지도가 사용되었다.

3. 결 과

3.1. 제주항 연안의 조석 및 해조류 분석

제주항 연안해역의 관측점(P3~P5)에서 관측한 조위 관측 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 이 시계열 자료로부터 제주외항 부근해역은 일조부등이 현저함을 알 수 있으며, 조차는 2 m 정도로서 제주항의 검조소에서 관측된 평균조차 2.028 m와 거의 같은 값을 보이고 있다. 15일간의 관측된 자료를 분석한 결과 조화상수는 각각 M_2 분조의 진폭은 67.4 cm, 지각은 313.6°, S_2 분조의 진폭은 26.4 cm, 지각은 326°, O_1 분조의 진폭은 24.3 cm, 지각은 219.2° 그리고 K_1 분조의 진폭은 16.0 cm, 지각은 195°이었다. 또한 해조류관측 자료를 분석하여 Tidal ellipse(Fig. 3)와 Stick diagram(Fig. 4~5)을 나타내었다. 연구대상 해역은 양과 최(1999)의 연구결과와 같이 일조부등이 탁월하며, 유속의 흐름은 동서방향이 남북방향보다 강하게 나타나고 있다. 또한, 각 관측지점의 U성분은 (+)값이 크게 나타나 동류인 낙조류시의 흐름이 서류인 창조류보다 강하게 나타나고 있다. 이때, 낙조류의 최대유속은 94.7 cm/sec이었다. 이들 자료로부터 제주항의 유속은 M_2 , S_2 성분의 반일주조성분의 조류가 현저했다.

Fig. 2. Tidal elevation at P5, P3 and P4.

Fig. 3. Tidal ellipse at St. P1 and St. P2.

Fig. 4. Stick diagram and U-V components at P1.

Fig. 5. Stick diagram and U-V components at P2.

3.2. 수치유동 결과

제주외항 부근 2개 지점의 조위 관측 결과와 수치 모형에서의 계산 결과를 대조기 25시간 동안의 시계열로 각각 도시하였다(Fig. 6). 이들 관측점의 자료는 실측 조위 값을 수치모형에서의 입력조건으로 설정하기 위하여 조화분해를 실시하여 M_2 , S_2 , K_1 , O_1 을 포함하는 27개 분조의 진폭 및 위상을 구하였다. 각각의 조위 검증점에서 제주항 및 대상영역의 전반에서 관측결과와 계산결과가 잘 일치하고 있으며, 본 모델이 대상해역의 조위를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6. Comparison between observed tidal elevation and computed ones at St. P5.

연구 대상해역에서 POM 모델에 의한 수치계산의 결과 표층유속이 중층 및 저층유속보다 크게 나타나고 있으나 표·저층간의 유속의 차이는 그다지 크지 않았다. Fig. 7~9는 3차원 예측모드(prognostic mode)에 해당하는 대조기에 각각의 조석위상에 따른 조류 벡터도를 표층과 중층 및 저층별로 나타낸 것이다. 대조기 표층에 대한 최강창조류시와 최강낙조류시의 유속분포를 나타낸 것이다. 외해역은 연안역에 비해 유속이 전반적으로 강하게(83 cm/s) 나타나고 있다(Fig. 7). 특히, 최강낙조류시 조천 앞 해역의 유속은 급격한 수심의 변화로 인하여 유속분포가 매우 강하며(86cm/s), 수심이 비교적 얇은 연안 천해역은 유속분포가 약한 편이다. 대조기 최강창조류시 중층과 저층의 유속분포와 최강낙조류시의 중층과 저층의 유속분포를 나타내었다(Fig. 8~9). 유속은 표층보다 약하며 외해역이 연안역보다 전반적으로 강하게(81 cm/s) 나타나고 있다. 모델구동결과 연구영역의 해수유동은 동-서방향의 흐름이 강하며, 창조류시 보다는 낙조류시의 유속이 강함을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 수심이 얇은 제주항 부근의 해수유동 및 순환상을 보다

Fig. 7. Horizontal distribution of surface in maximum spring flood(upper) and ebb(lower).

Fig. 8. Horizontal distribution of middle in max. spring flood(upper) and ebb(lower).

Fig. 9. Horizontal distribution of bottom in max. spring flood(upper) and ebb(lower).

Fig. 10. Horizontal distribution of surface in max. spring flood(upper) and ebb(lower).

상세하게 파악하기 위해서는 정밀한 수심자료와 상세 격자를 사용하여 파악할 필요가 있다.

Fig. 10는 해수유동에 미치는 바람의 영향을 파악하기 위해 평균 풍향 · 풍속을 고려한 최강창조류시와 최강낙조류시 표층에 대한 계산결과이다. 해수유동에 대한 평균 풍향 및 풍속의 영향은 현저하게 나타나지 않고 있다. 바람의 영향으로 인한 해수유동의 차이를 Fig. 11에 나타내었다. 최강창조류시의 유속에는 거의 변화가 없었으나, 최강낙조류시 연안역에서 잔차류는 최고 0.56 cm/s, 외해에서 0.1 cm/s로 나타났다. 이는 외해에 비하여 수심이 낮은 제주외항과 조천 연안역 등의 내해에서 급격한 수심 변화로 인한 해저마찰과 바람의 영향을 많이 받고 있는 것으로 사료된다(Fig. 11). 이 같은 결과는 한국 남해안에 위치한 득량만에 서도 나타나고 있다(박, 1997). 따라서 대상해역은 현

재 제주 신항만공사가 진행중인 해역에 향후 보다 정밀한 바람장을 고려한 해수순환모델을 적용하여야만 하겠다.

4. 고찰

해수유동 수치실험결과를 비교 · 검토를 위하여 대조기 25시간동안의 조류 계산결과와 대조기시 25시간 동안 관측되어진 조류 관측결과를 성분도를 이용하여 나타내었다(Fig. 12). 위쪽 그림은 P1지점의 조류 계산치를, 아래 그림은 관측치를 각각 나타내고 있다. 이들 결과로부터 계산결과와 관측치의 유향과 유속의 크기가 거의 일치하고 있으며 주 흐름방향 또한 잘 재현되고 있다. 이상의 결과에서 보면, 그 주된 유속의 크기와 흐름방향 모두 잘 일치하는 경향을 보였다. 따라서 조위 및 조류에 대한 현장 관측결과와 수치모형 계산결과를 비교 · 검토한 결과수치모형은 대상해역에 대한 조위 및 조류를 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

3차원 해수유동모델에 의한 수치해석을 실시한 결과로부터 대조기 창조류시 유속은 전 수심을 통하여 외해역은 연안역에 비해 유속이 전반적으로 강한(83 cm/s) 편이다. 이중 표층의 유속 분포가 중 · 저층에 비해 강하며, 중층과 저층 순으로 유속이 느려지고 있었다. 특히, 최강낙조류시 조천 앞 외해역의 유속 크기는 수심이 갑자기 깊어지므로 인하여 유속분포가 빨라지는(86 cm/s) 반면, 수심이 비교적 얇은 연안의 천해역은 유속의 분포가 약하게 나타났다. 대조기 낙

Fig. 11. Surface velocity difference in ebb max. of spring tide by wind effects.

Fig. 12. Scattered diagram of tidal current computed (upper) and observed(lower) at St. P1.

조류시의 표·중·저층의 유속 분포 또한 표층에서 가장 강하며, 외해역이 연안역보다 전반적으로 강하게(81 cm/s) 나타나고 있었다. 특히 조천 외해의 저층에서는 해저 지형의 영향으로 약한 유속(66 cm/s)의 분포역이 나타나고 있다.

3차원 수치모델에서 제주항 주변해역의 해수순환을 재현한 결과와 관측한 해수유동자료를 비교·검증하기 위하여 각 관측 지점의 조위와 조류를 비교해 본 결과, 조위 검증점과 조류 검증점 모두 제주항 및 전 대상해역에서 관측결과와 계산결과가 잘 일치하고 있었다. 따라서 본 연구에서 사용된 수치모델은 대상해역의 조위를 잘 재현하고 있으며, 주 흐름방향 또한 잘 재현되었음을 알 수 있었다.

이상의 연구 결과로부터 수심이 얇은 제주항 부근과 연안역의 해수유동 및 해수순환상은 수심변화에 따라 특성을 보이고 있다. 또한, 바람의 영향에 의한 해수유동의 변화는 외해보다 연안역인 제주항 부근과 조천 연안역에서 크게 변하고 있었다. 이는 보다 정밀한 수심자료와 상세한 격자간격이 필요함을 의미하고 있다. 따라서 향후 이점을 고려하여 시그마좌표계에 의한 연직단면의 유속분포와 순환특성 및 단면별 유

속의 분포의 구조를 파악하여 대상해역에 대한 보다 정밀한 해수순환의 특성을 규명하여야 하겠다.

5. 결 론

제주외항을 포함한 연안해역의 해조류관측 자료와 외해역에서 관측한 해수유동의 자료를 분석하여 시공간적인 해류계의 특성 및 해수유동의 구조와 해수순환의 특성을 파악하였다.

제주항 연안해역은 일조부등과 M_2 , S_2 분조에 따른 조류변화가 현저하였다. 해조류는 동서방향 성분이 남북방향에 비해 매우 크게 나타나고 있다. 동서방향 중에서도 낙조류시 동류하는 흐름이 서류하는 창조류보다 강하게 나타났으며 이때 최대유속은 94.7 cm/sec이었다. 제주항 서방파제 말단부 해역의 조류 성분은 다른 해역에 비해 매우 약한 반면에 항류성분의 흐름은 크게 나타나고 있어 이 해역의 흐름은 제주항 방파제에 의한 영향을 크게 받고 있었다.

3차원 해수유동모델에 의한 수치해석을 실시한 결과 대조기 창조류시 유속은 전 수심을 통하여 외해역이 연안역에 비해 강하게 나타났으며 최대 유속은 83 cm/s이었다. 표층유속은 중·저층에 비해 강하며 수심이 깊을수록 유속이 느려지고 있었다. 최강낙조류시 수심의 변화가 큰 조천 앞 외해역의 유속은 매우 강한 반면 수심이 비교적 얇은 연안 천해역은 유속이 약하게 나타났다. 제주항 부근의 동절기 평균 풍속·풍향을 고려할 때 대조기 최강창조류시는 유속변화가 거의 없으나 최강낙조류시는 연안 천해역과 조천 앞 연안 해역에서는 0.1~0.5 cm/s의 유속이 증가하였다. 이는 바람의 영향이 외해역보다는 수심의 변화가 큰 연안역에서 크게 작용하고 있음을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 강태순, 1999, 3차원 해양순환모델을 이용한 남해동부해역 해수유동 특성연구, 석사학위논문, 부경대학교.
- 박성은, 1997, 바람이 가막만의 조류에 미치는 영향, 석사학위논문, 부경대학교.
- 양성기, 김해동, 최찬문, 1995, 제주도 함덕연안해역의 해황·기상의 계절변동에 관한 연구, 제주대학교 해양연구소 연구보고, 19, 1-10.

- 양성기, 최찬문, 1999, 제주항의 해양수리학적 특성, 제주대학교 해양연구소보, 23, 9-21
- 윤은찬, 2003, 낙동강 하천플룸의 3차원 혼합거동 해석, 석사학위논문, 부경대학교.
- Blumberg, A. F., Mellor, G. L., 1987, A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model in Three-Dimensional Coastal Ocean Model, vol.4, in: Heap, N. (ed.), American Geophysical Union, Washington, D.C., 1102-1121.
- Blumberg, A. F., 1975, A Numerical Investigation into the Dynamic of Estuarine Circulation, Technical Report 91, Chesapeake Bay Institute, The Johns Hopkins Univ., 2103-2116.
- Christopher, N., Moores, K., Kang, H. S., 1997, Simulation of the Tsushima Warm Current in the Japan(East) Sea, International Symposium on Tsushima Warm Current, 1-38.