한국해안 · 해양공학회지
제 19 권 제 5 호, pp. 476~483, 2007년 10월

수치해석을 이용한 이어도 기지 구조물이 해수 유동에 미치는 영향 분석과 해류 관측 평가 및 보정방안 연구

Numerical Investigation, Calibration Method of the Interaction between Ieodo Ocean Research Station and Ocean Current

홍우람* · 심재설** · 민인기*** · 김종암****
Woo-Ram Hong*, Jae-Seol Shim**, In-Ki Min*** and Chongam Kim****

요 지 : 이어도에 건설된 다목적 해양과학기지에서는 주위 대류 및 해류의 데이터 수집을 통해 기상, 어장예보 등의 기초 자료를 제공하는 것을 한 가지 목적으로 한다. 그런데 이어도 기지 구조물에 의한 해수 유동의 변화는 과학기지의 관측 데이터에 영향을 주어 정확한 자료 수집을 어렵게 하므로, 이어도 기지 구조물이 주위 유동에 미치는 영향을 분석하고 유동 정보 관측을 평가/보정하는 방법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위한 기초연구로, 해류와 구조물 사이의 상호 작용을 모사할 수 있는 알고리즘을 연구, 적용방법을 논의한다. 그 결과, 3차원 전산유체역학을 이용한 수치해석을 통해 이어도 기지 구조물 및 수중암초가 주위 유동에 미치는 영향을 연구하고 정확한 데이터 측정방법을 제안한다.

핵심용어 : 해양과학기지, 전산유체역학, 유동정보 관측, 보정

Abstract : One of the main function of Ieodo Ocean Research Station is to service the information about the weather and fishing grounds condition which are collected through calibrating convection flow and ocean current around the station. However, due to the influence of the station's structure below sea level, it is difficult to obtain the exact flow data. Therefore, it is required to research on the effect of the structure and the method to evaluate and revise the observed data. In this paper, as a basic study, it deals with the algorithm that simulate the interaction between ocean current and the station structure, followed by discussions about the way to applicate the algorithm. Through 3-dimensional computational fluid dynamics analyses (using Navier-Stokes equations with K-turbulence model), the influence of the station and submerged rocks are quantitatively evaluated, and we would suggest methods how to obtain accurate flow information from the measured rough data.

Keywords : Ieodo Ocean Research Station, Ocean current, influence of structure, observation error, computational fluid dynamics (CFD)

1. 서 론

과학 기지 설립 취지인 해수 정보의 정확한 관측을 수행하기 위해서는 지형적 요인과 인공구조물의 형상이 유동에 미치는 영향을 아는 것은 필수적인 연구 과정이다. 이 영향을 알아보고 실제 연구에 반영하기 위해 본 연구에서는 전산유체역학을 이용하여 문제에 접근하였다. 이는 실제 측정이나 실험을 통한 방법에 비해 시간과 비용을 최소화 할 수 있고 해류를 가시화 할 수 있다는 장점이 따른다. 계산에 따른 정확한 결과를 도출하기 위해서는 측정

*서울대학교 기계항공공학부 ASDL(Aerodynamic Simulation and Design Lab)박사과정
**한국해양연구원 연안개발연구본부 책임연구원(Coastal Development Research Division, KORDI, Ansan P.O. Box29, 425-600, Korea)
***한국해양연구원 연안개발연구본부 기술원
****서울대학교 기계항공공학부 부교수(Corresponding author: Chongam Kim, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea. chongam@snu.ac.kr)

을 통해 얻은 자료를 초기조건으로 부여하는 것이 가장 바람직하다. 그러나 이는 여러 차례의 측정실험을 요구하게 되므로 본 연구에서는 초기조건을 간단한 해류로 가정하여 접근하였다. 그 결과를 실제 과학기지에서 측정한 결과와 비교하여 과학기지 구조물과 이어도 부근 해역의 해저지형이 유동에 미치는 영향을 알아보는데 초점을 맞추었다. 또 해류의 방향과 특성에 의해 생기는 관측 자료의 신뢰도 변화를 전산유체 유동해석을 통해 예측하고 정확한 데이터 측정을 위한 관측 장비 운용 방법을 알아본다.

2. 해석 격자

2.1 해저지형 모델링

해양연구원을 통해 이어도 기지 부근의 2만개 수심데이터를 받아 4제곱킬로미터 영역의 해저지면을 Fig. 1과 같이 도면화 하였다.

Fig. 1에서 표시된 경계는 지형의 수심변화가 큰 부분이다. 유동에 있어서 수심의 변화는 속도와 압력에 큰 영향을 주게 된다. 해양기지의 위치특성을 살펴보았을 때 수심 40 m 가량의 좁고 평탄한 지역에 위치하고 있음을 알 수 있다. 기지의 북쪽으로는 수면으로 솟은 지형과, 남쪽으로는 10 m 가량 낮아지는 지형과의 경계면이 절리와 같은 모양을 형성하고 있다.

2.2 해양과학기지 구조물 모델링

설계도를(한국해양연구원·현대중공업, 2003) 참고하여 이어도 기지의 해수면 아랫부분을 모델링 하여 도면과 동일하게 모델링 된 구조물의 표면에 격자를 형성한다. 복잡한 구조물 주변에는 비정렬격자를 형성하였고 구조물에서 먼 곳에는 정렬격자를 사용하였다. 이상과 같은 방법을 통해 원방으로 100만 여개의 격자를 만들었다.

3. 수치해석 방법

3.1 지배방정식

과학기지 모델에 작용하는 힘으로 압력 외에 점성력까지 고려하기 위하여, 지배방정식은 3차원 비압축성 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 이의 질량 보존식과 운동량 보존식은 다음과 같으며 x방향의 식만 기재하였다(Anderson, 1991).

◦질량 보존식:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

◦운동량 보존식:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu\frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij}$$

ρ: density p: pressure

τ: stress tensor μ: viscosity

δ: Kronecker delta (2)

본 연구의 해석 모델인 해양과학기지의 유동 영역은 레이놀즈수가 5×10^7 정도인 난류유동 영역이므로, 2방정식 난류모델인 표준 k-ε 모델(Pope, 2003)을 사용하였다. 수식은 다음과 같다.

◦표준 k-ε 난류모델:

$$\frac{Dk}{Dt} = \nabla\cdot\left(\frac{\nu_T}{\sigma_k}\nabla k\right) + p - \varepsilon$$

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = \nabla\cdot\left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon}\nabla\varepsilon\right) + C_{\varepsilon1}\frac{p\varepsilon}{k} - C_{\varepsilon2}\frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\nu_T = ck^{1/2}l_m,\ \varepsilon = C_D k^{3/2}/l_m,\ C_{\varepsilon1} = 1.44,\ C_{\varepsilon2} = 1.92,$$

$$\sigma_\varepsilon = 1.3 \tag{3}$$

k: turbulent kinetic energy

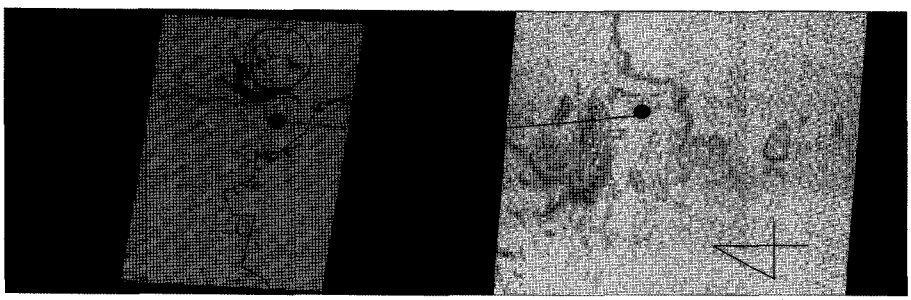


Fig. 1. Geometry modeling of the seabed.

ε: rate of dissipation of turbulent kinetic energy

σ_ε: turbulent Prandtl number for dissipation

p: rate of production of turbulent kinetic energy

3.2 경계조건

과학기지를 포함한 육면체의 검사체적을 설정하여 각각의 경계면에 적절한 조건을 부여하였다. 외각의 네 개의 면 중 두 개는 유입류로, 나머지 두 면은 유출류로 조건을 주었다. 자연 해류의 높이에 따른 속도분포는 알 수 없으므로 3 m/s, 6 m/s, 9 m/s의 유속을 조건으로 주었고 과학기지로부터 350 m 떨어진 외각에서 유입되는 것으로 가정하였다. 이는 과학기지의 부근의 높이 40 m의 9배 정도의 거리이며 관내유동 가정으로 높이에 대해 균일한 유입류가 충분히 발달되어 높이에 따라 다른 속도분포를 형성하고 경계층을 나타내며 기지를 통과하도록 설정해준 것이다. 2차원 관내유동의 난류에서 균일한 유동의 유입이 있을 경우 관 폭의 일정배수 이상을 유동이 흘러가게 되면 경계층이 충분히 발달한다. 따라서 본 연구에서도 유입조건을 균일 유동으로 조건을 주었고 유동이 기지에 미치기 전에 경계층이 완전히 발달된 것을 확인하였다. 해저 바닥 면은 점성 벽면조건을 주었다. 해수면은 z 방향의 속도를 0으로 가정한 대칭 조건으로 가정하였다(Fluent, 1998).

4. 해석격자 주위의 조건

4.1 해류측정위치 및 측정방법

해류의 측정위치는 기지 최상층의 헬기장 상판의 북서쪽 모서리(Fig. 2, left)에서 수직으로 내린 해저면이다. 기지의 중심에서 북쪽으로 21.5 m, 서쪽으로 13 m 떨어진 곳(Fig. 2, right)이다. 이곳의 위치 특성상 유동이 기지를 통과 않고 바로 측정되는 북쪽 계열의 유동(Fig. 2의 화살표)은

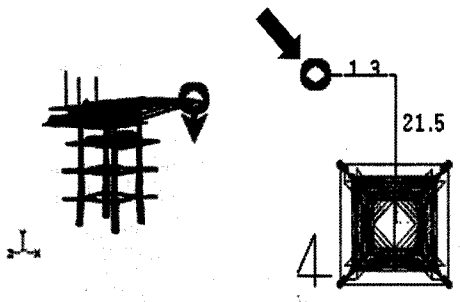


Fig. 2. Location of the instrument(left: side view, right: upper view).

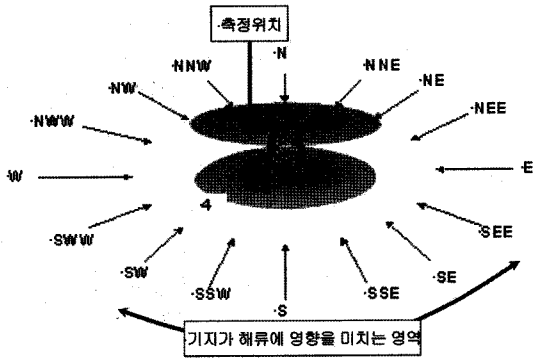


Fig. 3. Measurement location and category of sea flow direction that are influenced by the structure.

측정에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 보이며 남쪽 계열의 유동(Fig. 3)에서 구조물의 영향이 크게 반영된 데이터가 측정될 것으로 예상된다. 이어도 해역에서의 연직수심별 해수유동 특성을 관측하기 위하여 600 kHz ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler, RD instrument)를 해저면에 설치하고 2005년 7월과 8월 사이에 약 50일간 관측을 실시하였다. 설치지점은 평균수심이 약 42 m로서, 해저면 기기 설치점으로부터 10분 간격으로 수심, 수온, 수압 및 층별(2 m 간격) 유속과 유향을 관측하고, 1시간 간격으로 파고 자료를 관측하여 기록하였다.

4.2 유동 조건

기지구조물을 중심으로 16 방향의 유향을 설정하였다. 정 동쪽을 기준으로 하여 22.5도 씩 360도까지 바꾸어 가며 계산을 수행하였다. 유속의 경우 3 m/s, 6 m/s, 9 m/s 등 세 가지 다른 속도로 자유류를 설정하였다. 초기유속은 수심에 관계없이 동일한 유속으로 유입이 된다고 가정하였다. 이상과 같이 48개의 경우에 대해서 기지 구조물이 있는 경우와 없는 경우를 고려하여 총 96가지 경우에 대한 계산을 수행하였다.

5. 수치해석 결과

전술한 바와 같이 구조물이 없는 경우(이하 Case1)와 구조물이 있는 경우(이하 Case2)에 대한 수치해석 결과를 비교하여보았다. 부록에 첨부한 Table에서 보는 바와 같이 남~동(반시계방향, 정 동쪽을 기준으로 270도에서 360도 까지) 해류에 대한 데이터는 구조물의 영향을 받는 것으로 알 수 있다. 따라서 앞의 결과에서 얻어진 구조물 영향의

수치적 차이를 측정된 데이터에서 제하여 주면 원래의 해류에 더 가까운 데이터를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

반대로 Fig. 3에서 표시하지 않은 방위인 동쪽에서부터 남서서 방향의 해류까지의 속도 분포는 Case1과 Case2가 거의 유사한 형태를 보이므로 수치적으로는 구조물의 영향이 거의 미치지 않는다고 볼 수 있다. 수심 40에서 30 미터 내외 까지 유동 경계층이 형성되었다. 또 구조물이 있는 경우와 없는 경우의 속도분포를 비교해 보면 거의 차이가 없다. 유속이 3 m/s인 경우와 9 m/s인 경우 모두 6 m/s인 경우와 다르지 않았고 따라서 9 m/s 이하의 유속에서는 수심에 따른 속도분포가 초기유속에 대해 독립적임을 알 수 있다. 기지 구조물이 유속에 영향을 주는 경우의 속도분포는 부록의 Table과 같다.

6. 결과 토의

6.1 결과 분석

측정결과의 경우 날별 평균을 내어야 하나 속도 분포의 경우 기후의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 따라서 해풍의 영향이 가장 적고 수심에 따른 유속의 분포에 외부적 요인의 영향이 최소인 날의 측정결과를 선택하여 비교하였다.

이상의 계산결과를 측정데이터와 비교해 보았다. 부록에 첨부된 Table의 수치적 실험결과를 수심별로 모아 구조물이 없는 경우(Case1)와 구조물이 있는 경우(Case2)를 비교하여 Fig. 4와 같이 나타내었다. 실제 측정결과에 대한 정확도를 보면 약 10%가량 Case2가 더 높은 것을 알 수 있

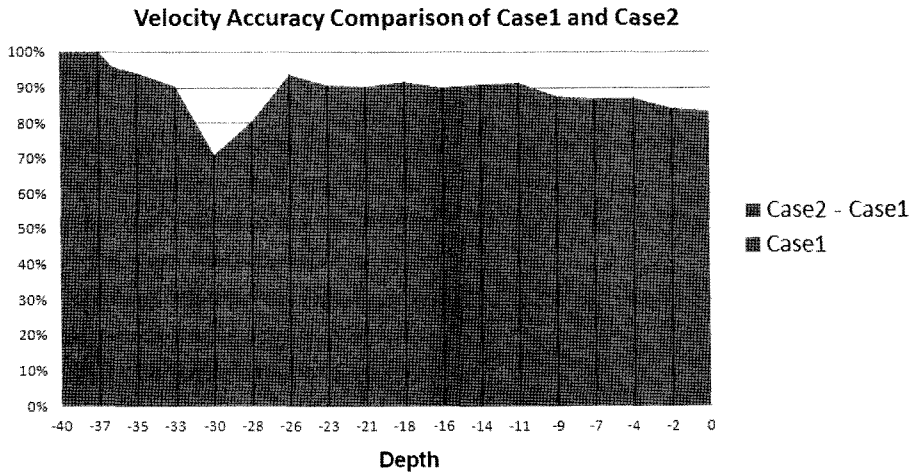


Fig. 4. Velocity accuracy comparison (by standard as experimental data).

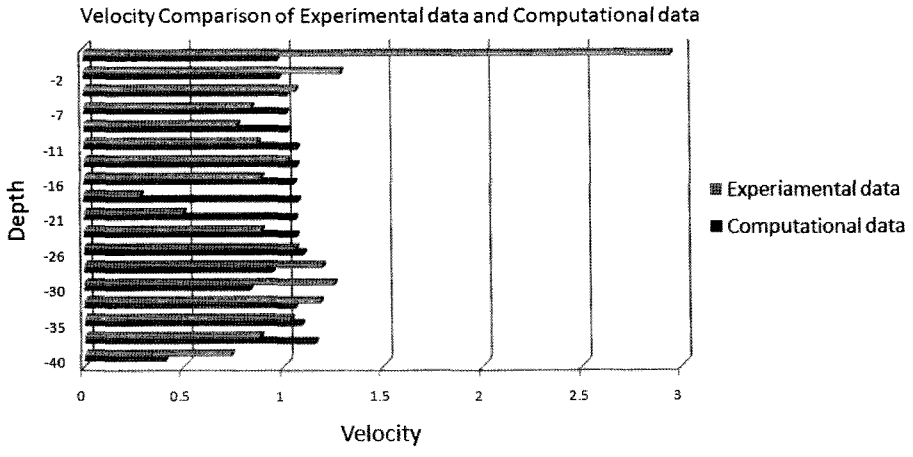


Fig. 5. Velocity distribution along the depth.

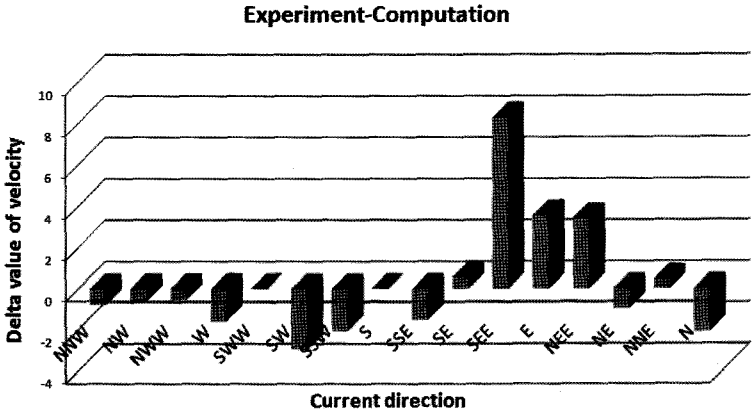


Fig. 6. Sum of velocity delta value between experimental and computational data.

다. 따라서 유속분포는 Case2를 기준으로 측정결과와 비교하도록 하겠다. Fig. 5는 계산결과인 Case2와 측정결과와의 비교이다. 모든 방위에 대해서 구조물이 있는 경우의 계산결과와 실험결과를 깊이에 따른 속도의 정확도를 비교해보면 수심이 얕은 수면 근처에서의 유속예측이 가장 큰 오차를 나타냈고 수심 18 m 부근의 유속도 큰 오차를 보인다. 계산의 결과는 외부 기후와 해류 등의 영향이 고려되지 않은 것이므로 비교적 균일하고 선형적 변화를 나타내는데 반해 측정한 결과는 대기와 맞닿아있는 수면이 바람의 영향을 받으며 수중에서는 수심 18 m를 기점으로 각기 다른 특성의 유동흐름이 나타나는 것을 유속분포를 통해 확인할 수 있다.

Fig. 6은 해류방향에 따른 측정결과와 계산결과의 차이에 대한 누적된 값을 나타내고 있다. 해류의 방향예측 정확도를 보면 앞에서 예상한 대로 남서서(SWW) 방향에서부터 남동동(SEE) 사이의 정확도가 떨어지는 것을 알 수 있다. 추가적으로 동쪽(E)과 북동동(NEE)까지도 계산에 의한 예측결과와 측정결과의 차이가 발생하고 있다. 이는 구조물을 통과해 지나가는 유동의 후류효과가 계산결과보다 측정결과에서 더 큰 범위에 걸쳐 영향을 주고 있다는 것을 보여준다. Fig. 7는 수심별 유향의 예측결과를 나타낸다. 유향의 경우 모든 방향에 대해 평균하여 수심에 따른 각도를 나타낸 것이다. 북쪽을 기준으로 한 유향 각도는 하루를 기준으로 0도에서 360도 까지 변하게 되므로 평균치는 180도 부근이 된다. Case1과 Case2의 유향 예측결과는 큰 차이가 나타나지 않는다. 상대적으로 수심 15 m까지의 계산결과가 측정결과와 많은 차이가 발생하며 이는 기상조건을 비롯한 밀, 썰물에 의한 수심변화 등의 외부조건의 영향

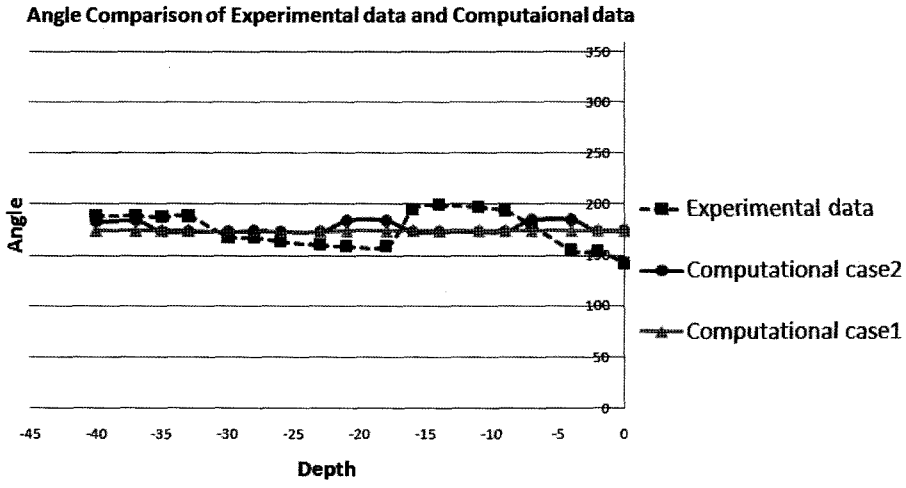


Fig. 7. Current direction angle compared Experimental data with Case1, Case2.

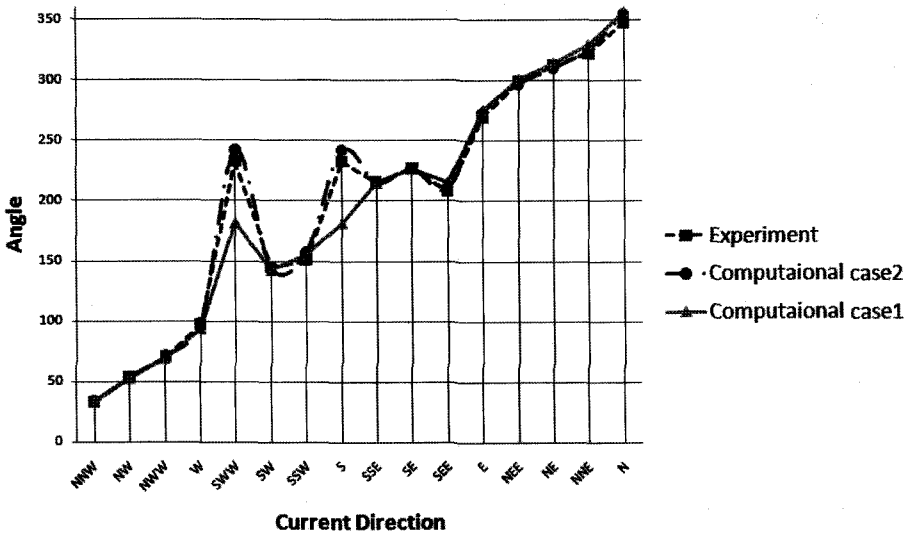


Fig. 8. Averaged angle distribution matched with initial current Direction.

인 것으로 보인다. Case1과 Case2의 차이는 부분적으로 나타나는데 이는 순수한 구조물의 영향인 것으로 볼 수 있다.

Fig. 8은 초기유동의 방향을 기준으로 방위를 정하여 계산결과의 유향각도를 대응시킨 그래프이다. 그 결과 방위별 유향 각도 예측의 정확도를 보면 남서서(SWW)방향과 남(S)방향의 해류를 제외하고 유사한 경향을 보인다. 따라서 유향의 경우 계산결과와 측정결과의 차이가 크지 않음을 알 수 있으며 유속의 오차 또한 일정한 차이를 나타내므로 Case1과 Case2를 통해 얻은 구조물의 영향에 의한 속도차를 구할 수 있다. 이를 측정결과에 적용하여 측정결과에 반영된 구조물의 영향에 의한 오차를 필터링 할 수 있을 것으로 보인다.

6.2 보정 방안

각 방향에 따른 해수유동의 수치해석자료를 토대로 해저지형위에 구조물이 있을 때와 없을 때의 속도 차이를 수치화 하였다. 원시 해류의 유속을 예측하기 위해 다음과 같은 순서로 보정한다.

6.2.1 관측 데이터를 x와 y방향 성분으로 분해한다.

해류 계산 결과를 보면 z방향의 유동은 전체 유동의 10%미만이었고 수온을 비롯한 해류의 수직방향 변동요인은 고려하지 않았으므로 x,y성분만을 생각하기로 한다.

6.2.2 각 속도에 대한 데이터 중에서 지형만 고려된 데이터와 구조물까지 고려된 데이터의 x, y 속도 차를 각각 구한다.

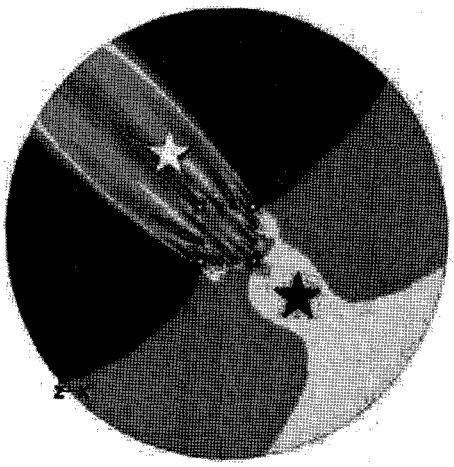


Fig. 9. Backwash stream line (Y-dir: North, X-dir: East, Bright star: calibration point, dark star: required extra calibration point).

6.2.3 이 차이만큼을 관측데이터에서 빼주면 원시해류의 속도 분포를 보정하여 구할 수 있다.

6.3 해류정보 측정위치 선정

기지 주변의 100 m 지름의 영역의 유동을 가시화 하였다. Fig. 9에서 나타나듯이 흰색 별로 표시된 측정위치가 해류가 구조물에 부딪쳐 발생하는 후류 영역에 포함되는 경우와 그렇지 않은 경우가 극명히 대조된다. 동쪽해류로부터 시작해서 시계방향으로 남동해류, 남해류, 남남서 해류까지가 구조물이 측정위치를 지나는 해류에 많은 영향

을 주는 영역임을 알 수 있다. 따라서 측정위치를 최소 두 군데 이상으로 설정하고 그 중에서도 Fig. 9에 표시된 파란 표시의 위치부근, 기지의 남동쪽 방향으로 측정위치를 하나 더 설정할 필요가 있다.

7. 결 론

본 연구의 목표는 이어도 기지 구조물로 인한 해수 유동의 변화를 예측하여 이로 인해 관측 결과에 미치는 영향을 보정하고 보다 정확한 관측에 필요한 추가적인 측정위치를 설정하는 것이다. Fig. 4에서 보여주듯이 전산유체역학을 적용한 수치해석 결과를 통해 구조물은 수심에 따른 유속분포에 대해 10% 정도의 차이를 발생시킨다. Fig. 5에서 유속분포 예측에 오차가 가장 많은 부분은 수심 2 m 부근과 수심 18 m 부근이다. 2 m 부근의 해수는 바람의 영향을 받는 것이 오차의 원인으로 보이며 18 m 부근은 밀, 썰물의 변화에 따라 상부의 유동과 하부의 유동이 구분되는 특성을 나타내기 때문으로 보인다. Fig. 6에서는 방위별 유속분포를 비교한 것이고 남남서 방향으로부터 반시계방향으로 동쪽까지의 유속에 많은 오차가 있음을 알 수 있다. 그 이유는 북서쪽에 설치된 관측기기가 이 방향으로부터 오는 유동의 유속을 측정할 때 구조물을 통과해온 유동을 측정하게 되기 때문이다. 따라서 관측기기가 받는 구조물의 영향을 최소화시키기 위해서는 2곳에 관측기기를 운용해야 하며 새로운 측정위치는 전술한 바와 같이 구조물의 남동쪽이 적당하다. 또한 구조물이 측정기에 미치는 영향은 유속부분에서 10%가량의 차이를 발생시키므로 이를 반영하여 원시해류에 대한 예측 정확도를 높일 수 있다.

측정된 결과와 수치해석 결과를 비교하면서 밀물과 썰물에 의한 방향과 바람의 방향이 혹은 기상의 상태가 상호 영향을 주고받으며 측정된 날마다 국소적으로 상이한 측정결과를 보임을 알 수 있었다. 따라서 외부 요인이 보다 적은 상태에서 측정된 데이터를 골라 비교하였고 계산결과의 타당성을 확보하고 보완할 방향을 결정할 수 있다. 유속과 유향에 영향을 주는 좀 더 많은 요소들을 고려하고 해류의 특성들을 모델화 하여 유입류의 초기조건을 보완한다면 좀 더 향상된 결과를 도출 할 수 있을 것으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 이어도 종합해양과학기지 구축 및 활용연구(KORDI PM43000) 사업의 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

Bing-Horng Liou (1998). Calculation of nonlinear free surface waves with a fully - Implicit adaptive-Grid Method. Princeton Univ.

Yign Noh and Hong Sik Min. (2003). Large Eddy Simulation of the Ocean Mixed Layer: The Effects of Wave Breaking and Langmuir Circulation. Institute of Meteorology and Climatology, University of Hannover, Hanover, (Germany).

Andrew, B.G. Bush. (1997). Numerical Simulation of the Cretaceous Tethys Circumglobal Current. Science vol.275.

Yukio Masumoto, Hideharu Sasaki. (2004). A Fifty-Year Eddy-Resolving Simulation of the World Ocean-Preliminary Outcomes of OFES (OGCM for the Earth Simulator).

Tatuya Sato. (2002). The Earth Simulator and Simulation Science. The Earth simulator center, japan Marine Science and Technology center.

서울대학교 공학연구소 (1991). 나산 보라매 타운 풍동실험 연구.

서울대학교 공학연구소 (1992). 부산 롯데월드 풍동실험 연구.

심재설, 오병철, 전인식, 황종국 (2002). 해양 구조물이 주변 바람장에 미치는 영향에 대한 연구. 한국해안해양공학회지, 13(2), 156.

심재설, 전인식, 황종국, 오병철 (2002). 풍동실험에 의한 이어도 해양과학기지의 풍력산정. 한국 해안해양공학회지, 14(2), 161-170.

심재설, 오병철, 전인식 (2003). 이어도 해양과학기지가 주변 바람장에 미치는 영향. 한국 해안해양공학회지, 15(2), 138.

한국해양연구원, 현대중공업. (2003). 이어도 종합해양과학기지 제작, 설치 공사 상세 설계도.

해양수산부 (2002). 이어도 종합해양과학기지 구축사업 보고서. 9(4). 383-421.

황종국, 김종암, 김윤석, 심재설 (2002). 이어도 종합해양과학기지 풍동실험 및 3차원 수치해석에 관한 연구. 한국풍공학회 발표논문집. 5, 45-52.

David C. Wilcox (1996). Turbulence Modeling for CFD. DCW industries USA.

Stephen, B. Pope (2003). Turbulence Flows. CAMBRIDGE. USA.

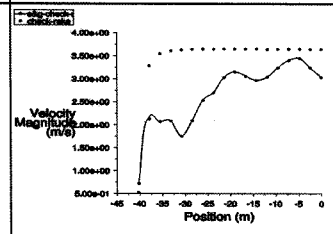
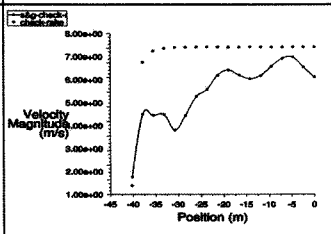
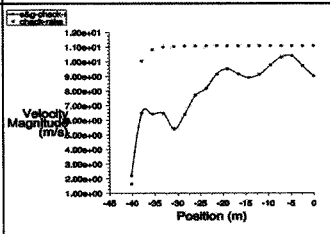
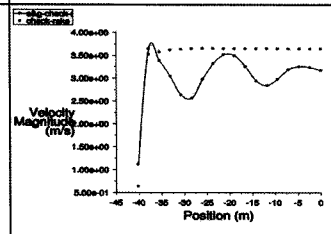
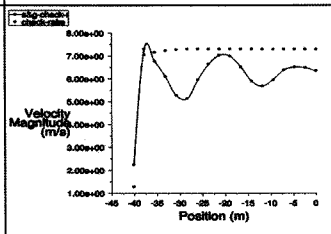
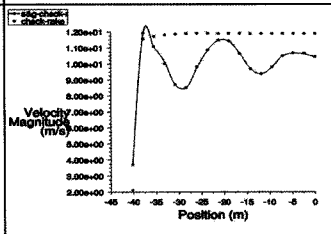
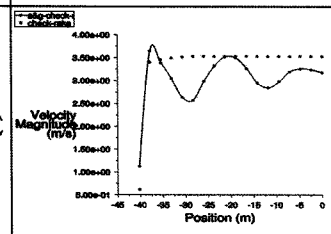
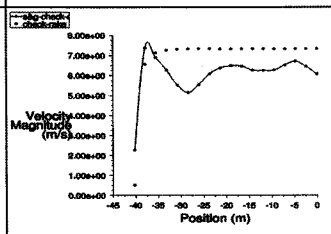
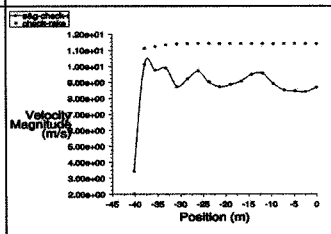
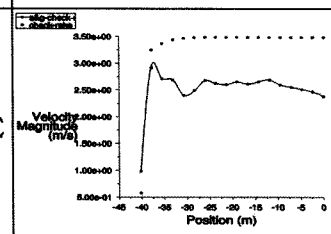
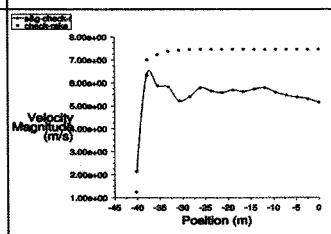
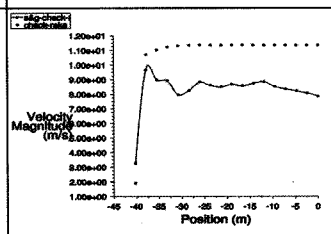
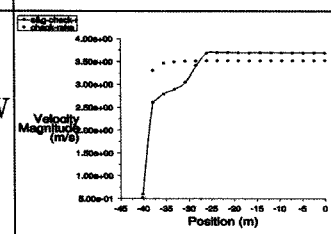
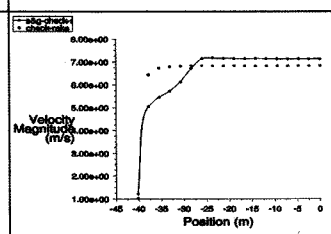
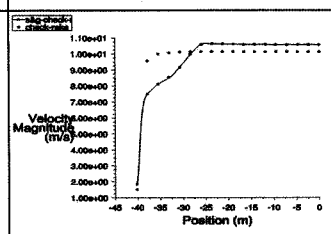
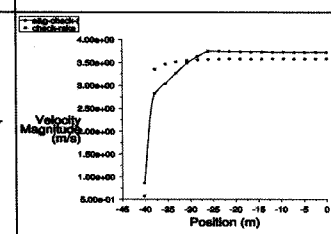
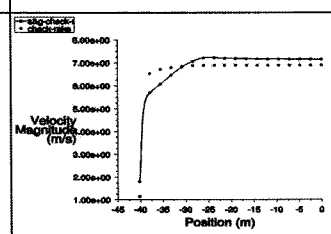
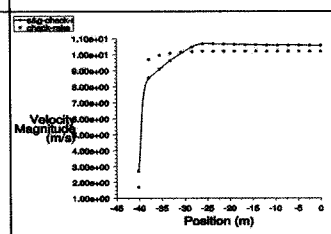
Fluent Inc. (1998). FLUENT 5 User's Guide. USA.

John, D. Anderson, Jr. (1991). Fundamentals of Aerodynamics. Mc Graw Hill. USA.

Received January 11, 2007
Accepted September 28, 2007

부 록

Table 1. Computational velocity profile data (dot: seabed geometry assumed, line-dot: structure and seabed geometry assumed)

	3m/s	6m/s	9m/s
S			
SE			
SEE			
SSE			
SSW			
SW