

수치해석을 이용한 이어도 종합해양과학기지의 해상풍 관측 오차 연구 Numerical Study on the Observational Error of Sea-Surface Winds at Ieodo Ocean Research Station

임진우* · 이경록* · 심재설** · 김종암*
Jinwoo Yim*, Kyung Rok Lee*, Jae-Seol Shim** and Chongam Kim*

요 지 : 수치해석을 통하여 이어도 종합해양과학기지 구조물이 대기 유동에 미치는 영향을 분석하였고, 이 결과를 바탕으로 과학기지에 설치된 풍속센서에서의 측정값 오차를 평가하는 연구를 수행하였다. 과학기지 형상을 3차원으로 모델링하였고 수치해석을 위한 격자를 생성하여, Navier-Stokes 방정식 및 난류모델을 적용하여 수치해석을 수행하였다. 선정된 자유류의 풍속과 풍향 조건에 대하여 과학기지 구조물에 의해 변화된 유동장을 계산하고, 실제 풍속센서가 설치된 위치에서의 풍속/풍향 정보와 자유류를 비교하였다. 이를 통하여 자유류 방향 및 측정 위치에 따른 데이터의 정확도와 신뢰할 수 있는 데이터 범위를 알아보았다. 본 연구 결과로 관측된 해상풍 데이터의 구조물 간섭에 의한 오차 범위를 정량적으로 파악할 수 있었으며, 과학기지가 위치한 지점의 정확한 해상풍 데이터 제공을 위한 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 이어도 종합해양과학기지, 해상풍, 구조물 간섭, 관측 오차, 수치해석

Abstract : The influence of Ieodo Ocean Research Station structure to surrounding atmospheric flow is carefully investigated using CFD techniques. Moreover, the validation works of computational results are performed by the comparison with the observed data of Ieodo Ocean Research station. In this paper, we performed 3-dimensional CAD modelling of the station, generated the grid system for numerical analysis and carried out flow analyses using Navier-Stokes equations coupled with two-equation turbulence model. For suitable free stream conditions of wind speed and direction, the interference of the research station structure on the flow field is predicted. Beside, the computational results are benchmarked by observed data to confirm the accuracy of measured data and reliable data range of each measuring position according to the wind direction. Through the results of this research, now the quantitative evaluation of the error range of interfered gauge data is possible, which is expected to be applied to provide base data of accurate sea surface wind around research stations.

Keywords : Ieodo Ocean Research Station, sea-surface winds, interference of structure, observation error, computational fluid dynamics (CFD)

1. 서 론

이에도에 건설된 다목적 종합해양과학기지에서는 주위 대류 및 해류의 데이터 수집을 통해 기상, 해양, 어장예보를 위한 기초 자료를 제공하는 것을 목적으로 한다. 그런데 이어도 과학기지의 크기가 매우 크기 때문에 주위의 대기 유동 흐름에 영향을 주게 되고, 과학기지에 설치

된 해상풍 관측 센서는 구조물에 의한 간섭을 받은 데이터를 도출하게 된다. 따라서 자유류 조건에 따라 관측 센서에서의 풍속 및 풍향 변화를 예측하는 연구가 필요하며, 이를 기초로 관측된 데이터를 평가 및 보정하면 보다 정확한 데이터를 제공할 수 있다.

이에도 과학기지 주위의 바람장에 대한 연구로 풍력 안정성에 대한 평가 연구가 실험 및 수치적인 방법으로 진

*서울대학교 기계항공공학부(Corresponding author: Chongam Kim, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea. chongam@snu.ac.kr)

**한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Coastal disaster prevention research group, KORDI, Ansan P.O. Box29, 425-600, Korea)

행된 바 있다.(심 등, 2002; 황 등, 2002) 이 때 수치해석에 의한 방법이 실험 결과와 비교하여 충분히 타당한 결과를 보여준다는 것이 확인되었다. 한편 이어도 과학기지가 주변 해상풍에 미치는 영향이 실험적으로 연구되기도 하였다(해양수산부, 2002; 심 등, 2003). 그러나 실험적인 어려움으로 해상풍의 연직분포를 고려하지 못하였으며, 축소모형 실험 후 실제 과학기지와 해상풍 크기에 대해 복원식을 사용한 결과를 도출하였다.

본 논문에서는 이어도 종합해양과학기지가 주위 해상풍에 미치는 영향을 수치적으로 연구하였다. 자유류에서 해상풍의 연직분포에 대해 고려하였으며, 실제 크기의 과학기지 모델에 대해 2가지 속도, 12방위에 대한 수치실험을 수행하였다. 3차원 유동 해석을 통하여 이어도 과학기지에 설치된 5개의 풍속 측정 센서 위치에서 자유류가 구조물에 의해 어느 정도의 간섭을 주는지 정량적으로 파악하고자 하였다. 그리고 정확한 데이터 도출을 위해 풍향에 따라 사용 가능한 데이터를 제공하는 풍속 센서를 선정하고자 하였다.

2. 해석 격자

2.1. 3차원 모델링

한국 해양연구원으로부터 제공받은 도면을 바탕으로 3차원 CAD 모델링 작업을 수행하였다. 이어도 과학기지는 장비설치를 위한 허부 데크(Cellar deck)와 주거 및 실험을 위한 주 데크(Main deck) 그리고 헬리콥터 이착륙장(Heliport)을 비롯하여 여러 개의 데크 구조로 이루어져 있으며, 여기에 여러 가지 관측 장비들이 설치되어 있다. 본 연구에서는 격자생성의 효율성을 위하여, 유동해석에 크게 영향을 미치지 않는 범위에서 부분적으로 복잡한 형상을 단순화 시켰다. 3차원 모델링이 끝난 뒤의 최종 형상은 Fig. 1과 같다.

그림에서 No. 1~5는 이어도 과학기지에 설치되어 있는 풍속 측정 센서의 위치를 나타내고 No. 3'과 4'은 풍동실험에서의 풍속 측정위치이다. 센서가 설치된 곳과 센서의 길이는 다음 Table 1에서 정리하였다.

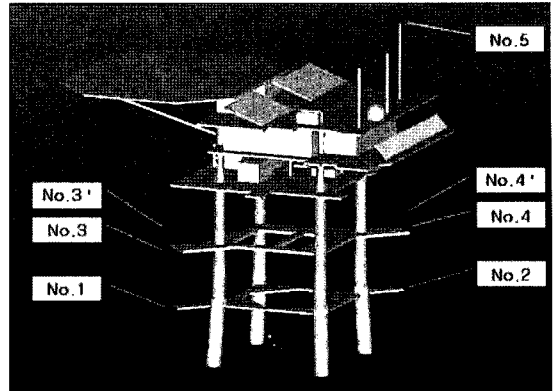


Fig. 1. 3-D Model of Ieodo Ocean Research Station and location of anemometer.

2.2 해석 격자 생성

해석 격자 생성에는 Gridgen 격자생성 프로그램을 사용하였다(Pointwise, 1999). 이 때 경계층과 같이 원하는 부분에 격자를 모으기 용이한 정렬 격자(structured grid)로 생성하였다.

복잡한 기지 구조물의 형상으로 인하여 해석영역 10 km(x) × 1 km(y) × 10 km(z)은 210만개의 격자, 360개의 블록으로 구성되었다. 계산 영역이 크기 때문에 효율성을 고려하여 구조물을 둘러싼 40 m(x) × 48 m(y) × 50 m(z) 크기의 작은 내부격자를 90만개의 격자로 생성하였고, 상대적으로 정밀한 계산이 필요 없는 외부격자는 120만개의 격자를 사용하여 내부와 외부격자를 patched grid 기법으로 연결하였다(Fig. 2, Fig. 3).

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 같다(Anderson, 1991).

Table 1. Location of anemometer (from Sea Level, Unit: [m])

		No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 3'	No. 4'	No. 5
Base Location		Jacket Deck (8 m)		Intermediate Deck (16 m)			Roof (33.5 m)	
from	Length	2[m]	2[m]	2[m]	2[m]	3[m]	3[m]	0[m]
B/L	Height	0[m]	0[m]	0[m]	0[m]	1[m]	1[m]	10[m]

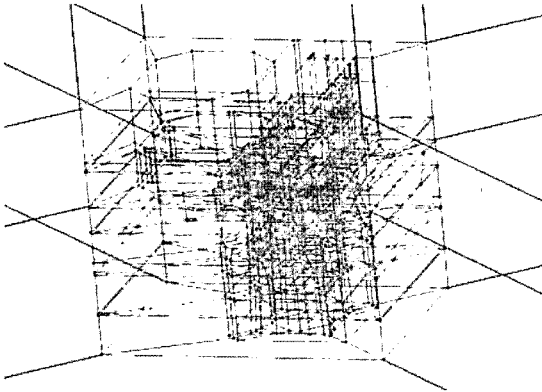


Fig. 2. Internal grid of Ieodo ocean research station.

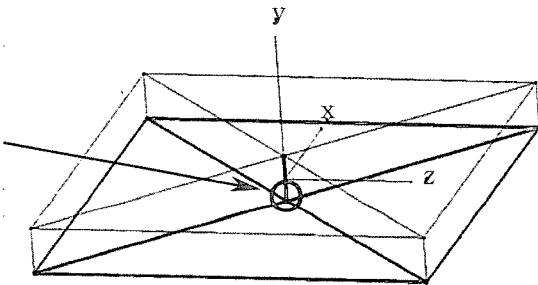


Fig. 3. External grid of Ieodo Ocean Research Station (red circle: internal grid).

◦ 질량 보존식:

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

◦ 운동량 보존식:

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

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

본 연구의 해석 모델인 해양과학기지의 유동 영역은 레이놀즈수가 10^7 정도인 난류유동 영역이므로, 2방정식 난류모델인 표준 $k-\epsilon$ 모델(Wilcox, 1996)을 사용하였다. 수식은 다음과 같다.

◦ 표준 $k-\epsilon$ 난류모델

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \epsilon$$

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k}$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{3}$$

3.2 경계조건

과학기지모델의 표면은 점착조건(no-slip condition)을 사용하였으며, 유입류는 속도를 고정하고 압력을 외삽하였으며, 유출류의 경우에는 배압을 고정하고 속도를 외삽하였다. 여기에서 유입류 속도의 경우 API 기준에 따른 해상풍의 연직 속도분포(서울대학교, 1991; 서울대학교, 1992)를 사용하였으며, 4.2절에서 자세히 다룬다. 바다의 경계조건의 경우 원래 파도가 있는 바다이지만 계산에는 고려되지 않았고, 유입류의 속도분포를 이어도 해양과학기지까지 유지시키기 위해 바닥면의 경계조건은 점성이 없는 벽면(slip-wall) 조건으로 주었다. 격자계의 맨 윗면과 유입류, 유출류면을 제외한 옆면은 대칭조건을 사용하였다(Fluent, 1998).

3.3 수렴조건

수치해의 수렴조건은 질량보존식과 각 방향 속도 및 난류모델의 k 와 ϵ 의 수치오차(residual)가 처음 오차의 10^{-4} 이하가 되면 해가 수렴한 것으로 보았다. 수렴곡선의 예는 Fig. 4와 같다.

위의 그림에서 볼 수 있듯이 질량보존식(continuity)의 오차(residual)가 10^{-4} 까지 떨어지면 나머지 오차는 모두 10^{-5} 이하까지 수렴함을 확인할 수 있다. 30 m/s의 풍향 0° 에서 수렴한 뒤의 속도벡터의 예는 다음과 같다.

수렴된 해석 결과에서 생성된 격자계가 경계층을 잡아

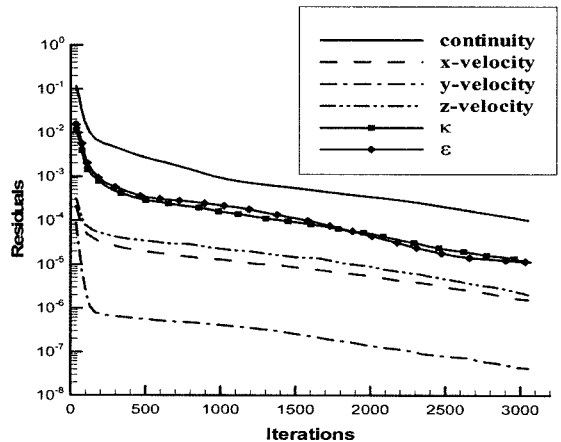


Fig. 4. Residual history.

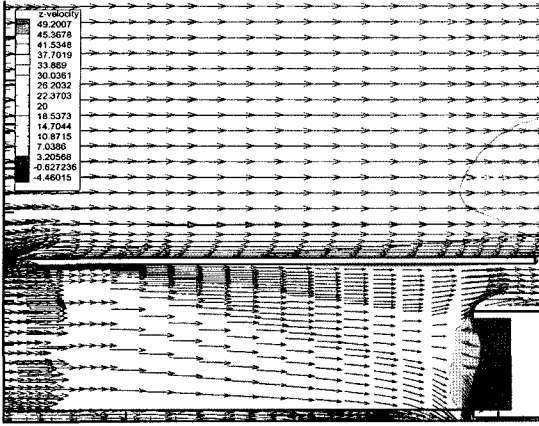


Fig. 5. Velocity vector over helideck.

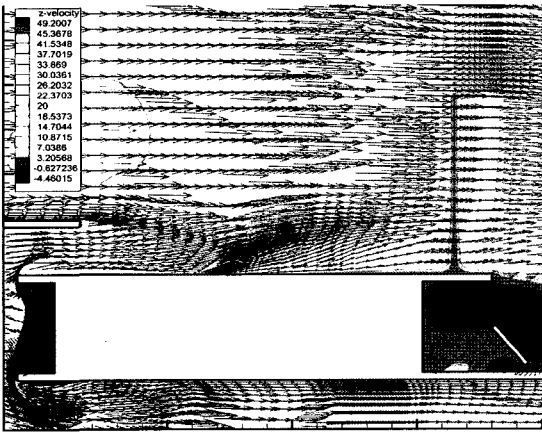


Fig. 6. Velocity vector over roof.

내기에 충분하므로 수치해석 결과를 신뢰할 수 있음을 알 수 있다. 또한 질량보존식의 수치오차가 10^{-4} 이하로 떨어지면 충분히 타당한 결과를 내었으므로, 이후의 수치해석에서 질량보존식의 수치오차가 10^{-4} 이하가 되는 것을 수렴조건으로 설정하였다.

4. 수치해석 조건

4.1 풍향 및 풍속 조건

해상 10 m 높이에서 풍속조건 12 m/s와 30 m/s일 때, 각각 case 1과 case 2로 하였다. 이 때 30도 간격으로 12방위의 자유류 조건에서 각 바람 측정 센서의 정확도를 판단하기 위한 해석을 수행하였다. 이를 정리하면 Table 2와 같다.

여기에서 풍향의 정의는 Fig. 7과 같다.

Table 2. Numerical analysis flow condition

No.	Wind velocity[m/s] (Sea Level 10 m)	Wind Directions
Case 1	12	12
Case 2	30	12

12 Directions:
 $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ, 210^\circ, 240^\circ, 270^\circ, 300^\circ, 330^\circ$

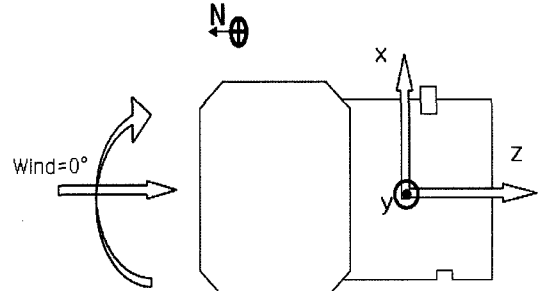


Fig. 7. Definition of wind direction.

4.2 경계층을 고려한 자유류의 연직 속도분포

일반적으로 바람은 지면으로부터 고도에 따라 속도가 증가하는 점성 경계층 유동이며 또한 난류 유동이다. 고도에 따른 평균 속도분포는 난류 경계층의 식으로부터 다음과 같이 된다.

$$u/U_\infty = (z/\delta)^{1/n} \tag{4}$$

(u : 평균속도, U_∞ : 경계층 외부 속도, z : 고도, δ : 경계층 두께)

이때 u 는 고도 z 에서의 평균속도이며, U_∞ 는 경계층 밖의 자유류의 속도이다. δ 와 $1/n$ 은 지형, 건물배치 등에 따라 다른 값을 사용하는데 여기에서는 API기준에 따라 다음과 같은 평균풍속의 연직분포를 사용하였고(서울대학교, 1991; 서울대학교, 1992)

$$U(1hr, z) = U(1hr, z_R) \left(\frac{z}{z_R} \right)^{0.125}; z_R = 10 \text{ m} \tag{5}$$

유입류의 경계조건으로 고정시켜 사용하였다.

5. 수치해석 결과

5.1 수치해석 결과 검증

풍동실험과의 비교를 통하여 부분적으로 간략화 된 이

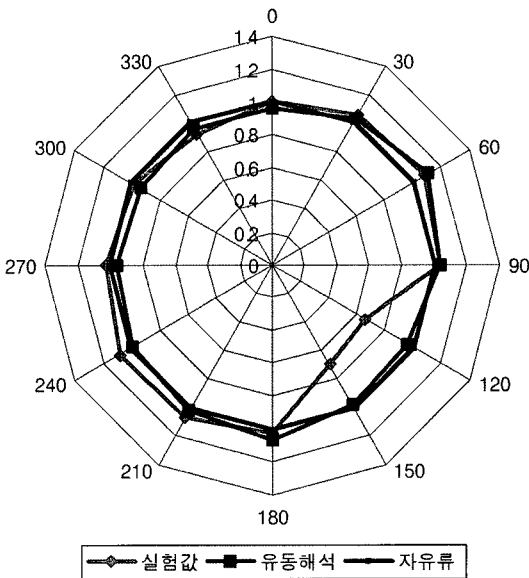


Fig. 8. Comparison of velocity magnitude at No. 3'.

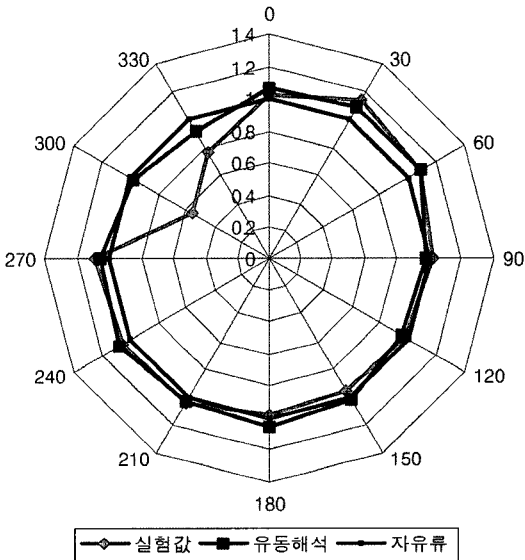


Fig. 9. Comparison of velocity magnitude at No. 4'.

어도 해양과학기지의 3-D 모델과 격자의 질을 점검하고, 수치해석의 검증을 위하여 수행을 하였다. 풍동실험의 경우 실제 속도의 수직분포대신 uniform flow 상황에서 1/80 축소모델로 실험을 하였고, 속도 측정 지점 3'과 4'에서의 velocity magnitude와 자유류(12 m/s)의 비를 사용하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 실험결과와 수치해석 결과 값들을 자유류와 비교한 것이다. 유입류가 이어도 과학기지 구조물

을 지나 풍속계에 도달하는 각도를 제외하고는 대부분의 유입류에 대하여 실험값과 수치해석 값과 자유류의 값이 잘 일치함을 알 수 있다. 위 그림에서 120, 150, 300, 330도의 경우, 수치해석 값이 실험값과 차이가 있음을 볼 수 있다. 우선, 풍속계의 위치가 Intermediate deck보다 1 m 위에 설치되었기 때문에 경계층 효과에 의한 유입류의 유동변화는 측정 위치에서의 속도변화에 큰 영향을 미치지 않는다. 하지만, Intermediate deck에 설치된 handrail은 풍속계의 위치와 동일한 높이에 설치가 되어있어 유입류의 유동에 변화를 주게 되어 속도의 감소를 초래하게 된다. 따라서 풍동 실험에서는 실제 모델과 같은 축소모델을 사용하였으나, 본 연구에서의 모델은 수치해석을 위하여 부분적으로 간략화 시켜 Intermediate deck의 handrail을 포함시키지 않았으므로 위와 같은 차이가 나게 된다. 하지만 실제 과학기지에 설치되어있는 센서의 위치는 Intermediate deck과 같은 높이에 설치가 되어 있으므로 handrail의 영향보다는 deck에 의한 유동변화가 지배적이므로 위의 그림에서 보듯이 수치해석 결과가 신뢰할 만 하다고 하겠다.

5.2. Case 1의 수치해석 결과

해발 10 m에서 12 m/s의 자유류 속도를 갖는다고 가정하였을 때 높이에 따른 속도분포는 다음과 같다.

$$U(z) = 12 \times \left(\frac{z}{z_R}\right)^{0.125} \text{ m/s; } z_R = 10 \text{ m} \quad (6)$$

유입류에서 식 (6)의 연직 속도분포를 사용하였으며, 360도 12방위로 유동해석을 수행하였다. 이를 통하여 바람의 방향에 따른 이어도 과학기지에 의한 자유류 유동변화를 시뮬레이션 할 수 있었고, 각각의 측정 위치에서 변화된 바람의 속도를 측정하였다. 유동변화의 비교에 사용된 속도 값들은 실제 이어도 과학 기지에 설치되어 있는 바람 측정 센서 1~5의 고도에 맞는 자유류의 속도값을 사용하였고, 이 값과 수치해석을 통해 얻어진 이어도 과학기지에 의해 변화된 속도값의 비를 분석해 보았다.

위의 그림 Fig. 10부터 Fig. 14는 각 센서의 위치에서 방향에 따른 유속의 변화율을 나타낸 것이다. 센서 5에서는 대부분의 각도에 대해서 유입류의 값과 큰 차이를 보이지 않고 있지만, 센서 1~4에서는 유입류의 각도가 이어도 과학기지 구조물을 지나게 되는 경우 유입류의 속도와 측정위치에서의 계산된 값이 큰 차이를 보이고 있음을 알 수가 있다. 이는 유입류가 풍속계에 도달하기 전에 Jacket deck과 Intermediate deck 위를 지나게 되면서

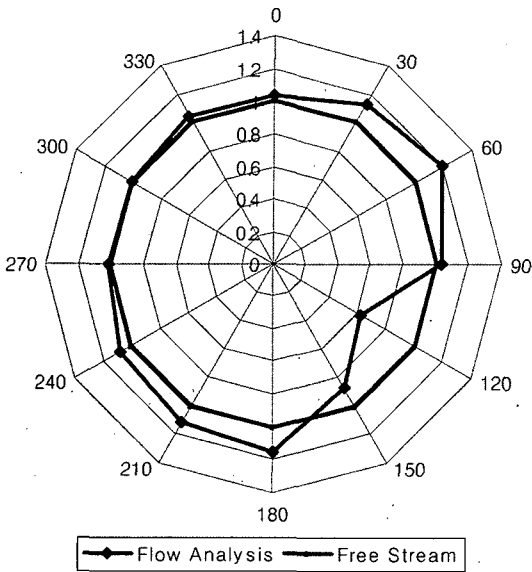


Fig. 10. Comparison of velocity magnitude at No. 1 (case 1).

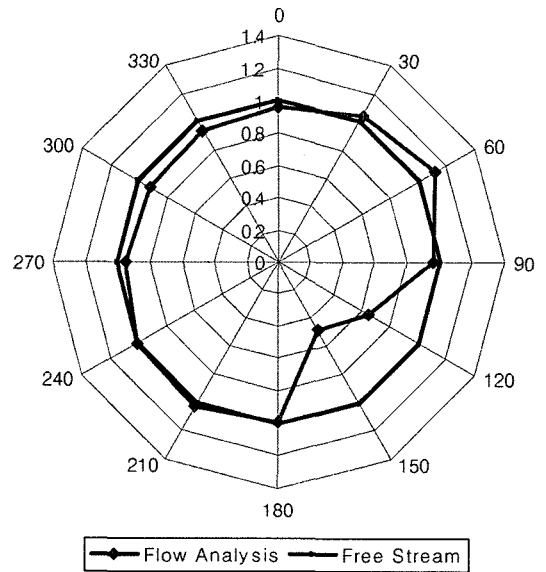


Fig. 12. Comparison of velocity magnitude at No. 3 (case 1)

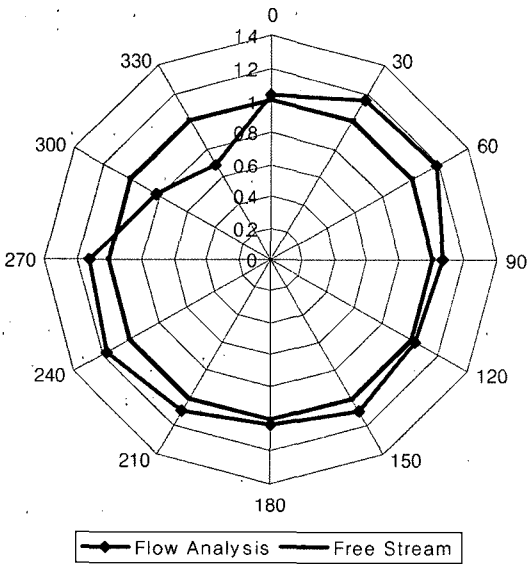


Fig. 11. Comparison of velocity magnitude at No. 2 (case 1).

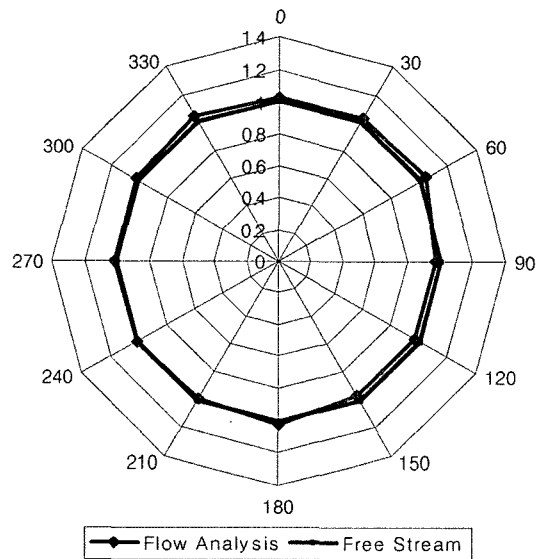


Fig. 13. Comparison of velocity magnitude at No. 4 (case 1).

점성에 의하여 속도가 감소하게 된 후, 데크와 같은 높이에 설치된 풍속계에 도달하게 되기 때문에 판단된다. 따라서 위와 같이 구조물을 지나게 되는 유입류 각도인 120, 150도 및 300, 330도의 경우 실제 유입류보다 작은 값이 측정되게 됨을 알 수 있다. 그러므로 실제 이어도 해양과학기술지에서 해상풍 정보를 얻고자 할 때, 바람의 방향에 따른 풍속계의 선택이 필요함을 알 수 있다.

5.3 Case 2의 수치해석 결과

이어도 해양과학기술지 구조물에 의한 자유류의 유동변화에 대한 다음 case로, 30 m/s의 자유류 경우에 대하여 수치해석을 하였다. case 1의 경우와 마찬가지로 API 기준에 따른 수직 속도분포를 사용하였고, 해발 10 m에서 30 m/s의 자유류 속도를 갖는다고 가정하였을 때 높이에 따른 속도분포는 다음과 같다.

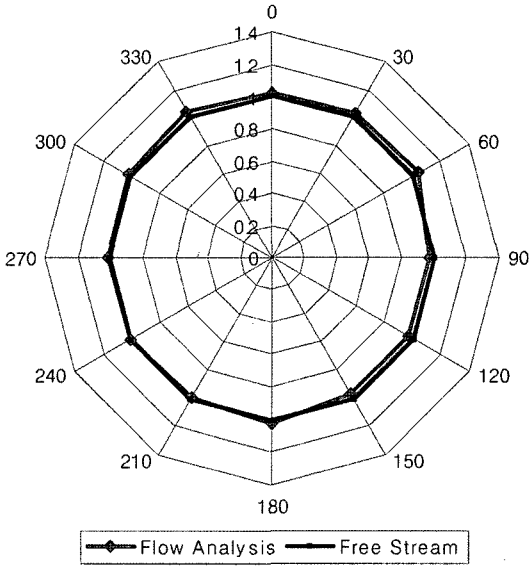


Fig. 14. Comparison of velocity magnitude at No. 5 (case 1).

$$U(z) = 30 \times \left(\frac{z}{z_R}\right)^{0.125} \text{ m/s; } z_R = 10 \text{ m} \quad (7)$$

유동 변화 분석에 사용된 값은 앞서와 같이 각 센서가 설치된 높이에서의 자유류 값이고, 각 실제 센서 위치에서 측정되는 수치해석 결과 값과 비교하여 구조물에 의한 유동의 변화정도를 알아보았다.

case 2의 수치해석 결과는 case 1과 동일한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이어도 과학기지에서의 풍속 데이터 측정 시에 자유류의 풍속보다는 풍향에 따라 적절한 위치의 풍속계의 선택이 필요함을 알 수 있다.

5.4 풍향 왜곡도

풍속 오차가 가장 적은 센서 5 지점에서 구조물에 의하여 발생하는 풍향의 왜곡도를 파악하였다. 자유류의 풍향을 z축으로 하여 수평각 왜곡도(α_H)와 연직각 왜곡도(α_V)는 다음과 같다.

$$\alpha_H = \tan^{-1} \frac{V_z}{V_x} \quad (8)$$

$$\alpha_V = \tan^{-1} \frac{V_y}{\sqrt{V_x^2 + V_z^2}} \quad (9)$$

위의 그림은 자유류의 풍속이 12 m/s와 30 m/s일 때 측정지점 5에서의 풍향 왜곡도를 나타낸다. 풍향 왜곡도는 Roof 쪽으로 바람이 직접 불어오는 180°에서 가장 큰 값을 가졌고 전체적으로 $\pm 7^\circ$ 이하로 나타났다.

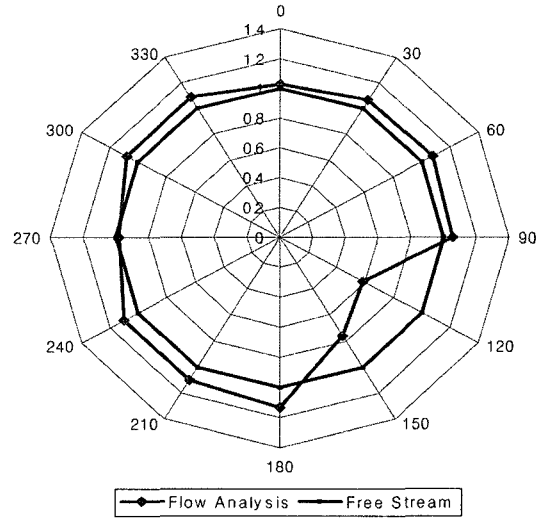


Fig. 15. Comparison of velocity magnitude at No. 1 (case 2).

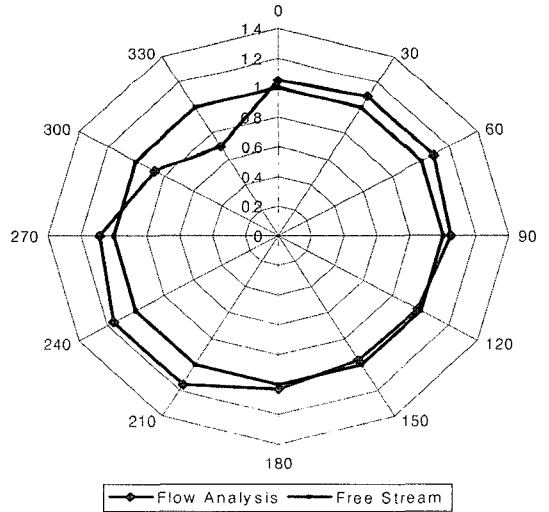


Fig. 16. Comparison of velocity magnitude at No. 2 (case 2).

5.5 유동 보정방안

5.2절 및 5.3절의 결과에서 유입류의 방향이 측정센서의 풍속값에 민감한 영향을 주는 것을 알 수 있었다. 그러나 Fig. 14와 Fig. 19에서 보듯이 Roof 10 m 높이에서 측정된 센서 5에서의 값은 전체적으로 자유류의 값과 5% 이내로 일치함을 알 수 있다. 또한 5.4절의 결과로 센서 5에서 측정된 풍향은 7%오차 이내에서 정확하다. 따라서 이어도 해양과학기지에서 정확한 해상풍 측정을 위해서는, 우선 해양과학기지의 Roof에 설치되어있는 5번 풍향계에서 유입류 방향에 따라 적합한 위치의 풍속계를 선택 후 일

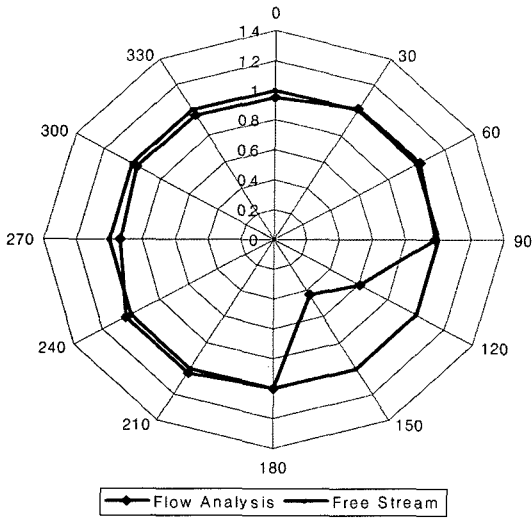


Fig. 17. Comparison of velocity magnitude at No. 3 (case 2).

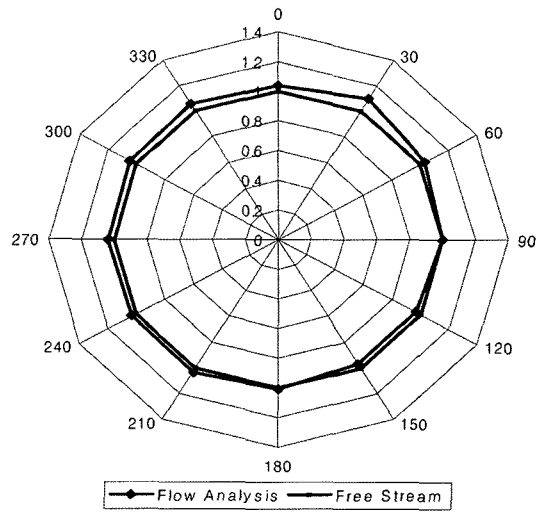


Fig. 19. Comparison of velocity magnitude at No. 5 (case 2)

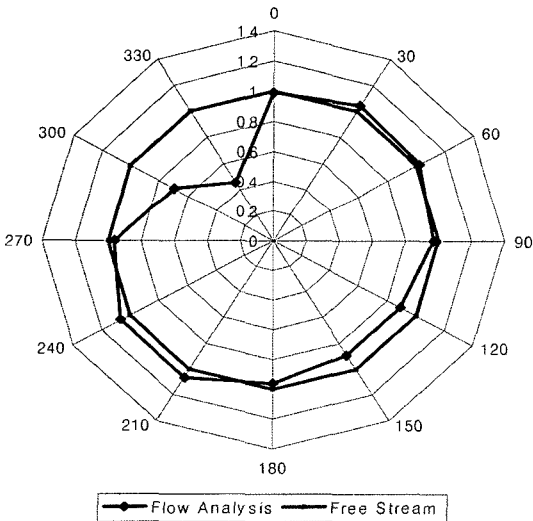


Fig. 18. Comparison of velocity magnitude at No. 4 (case 2).

반적으로 풍속을 측정하는 높이인 10 m 정도에 위치한 1, 2, 3, 4번의 풍향계를 사용하여 풍속을 측정하는 것이 적합하다. 예를 들어 5번 풍향계에서 측정된 풍향이 90°~180° 사이의 바람이라면 오차가 심한 센서 1과 3에서 측정하는 것보다는 2번과 4번의 풍속계를 사용한다. 반대로 300°~330°의 풍향에서는 센서 1와 3의 풍속계 측정값은 사용해야 정확한 측정이 가능하다. 이를 정리하면 Table 3과 같다.

이상에서 풍향에 따라 선택된 각 센서에서의 측정값을 비교한다면 가장 오차가 적은 해상풍 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

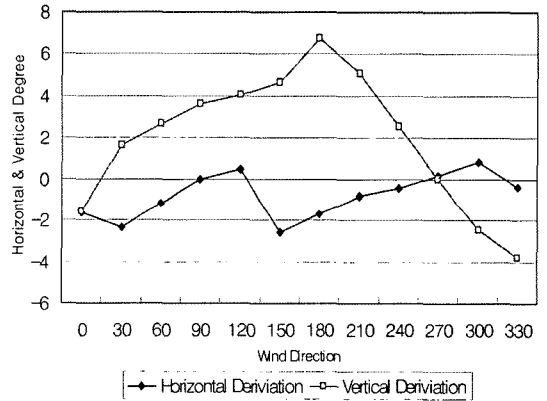


Fig. 20. Distortion of horizontal and vertical wind direction at No. 5 (12 m/s).

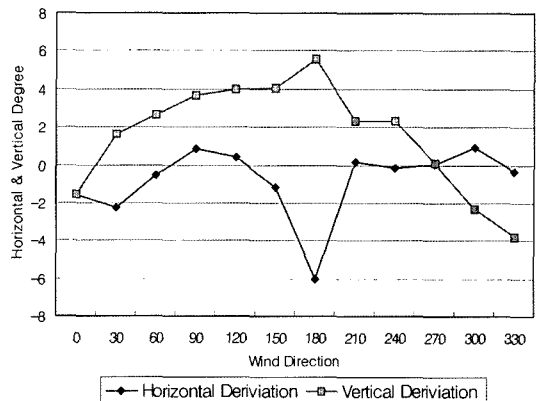


Fig. 21. Distortion of horizontal and vertical wind direction at No. 5 (30 m/s).

Table 3. Available anemometer according to free stream direction

Free stream direction	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4
0°~90°	○	○	○	○
90°~180°	×	○	×	○
180°~270°	○	○	○	○
270°~360°	○	×	○	×

6. 결 론

본 논문에서는 수치해석을 통해 이어도 종합해양과학기지의 간섭에 의한 해상풍 관측 오차를 알아보았다. 2가지 자유류 속도와 12방위에 대하여 3차원 유동해석을 수행하였으며, 실제 풍속 측정 센서가 설치된 5곳에서 기지 간섭으로 변화된 속도 및 풍향을 측정하였다. 해상풍 데이터는 해상풍이 바로 마주 불어오는 방향에 위치한 센서에서 가장 정확한 값을 예측하며, Roof에 설치되어 있는 센서 5에서는 풍향에 관계없이 비교적 정확한 자유류를 예측하였다. 따라서 센서 5에서 관측된 풍향에 따라 Table 3에 정리된 다른 센서의 데이터를 종합하면, 가장 정확한 해상풍의 속도 및 풍향을 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구 결과로 얻어진 데이터베이스는 각 센서들의 오차 경향을 파악하고, 보다 정확한 해상풍 정보를 제공하기 위한 기초 자료로 사용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원의 ‘이어도 종합해양과학기지 활용연구’ 사업의 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

참고문헌

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

서울대학교 공학연구소 (1992). 부산 롯데월드 풍동실험 연구.

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

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

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

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

David C. Wilcox (1996). Turbulence Modeling for CFD.

Pointwise (1999). Gridgen User Manual Version. 13.

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

John D. Anderson, Jr. (1991). Fundamentals of Aerodynamics.

Received March 2, 2006

Accepted September 1, 2006