

수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수치모형

이종섭 · 박일흠*

부산수산대학교 토목공학과 · *부산수산대학교 해양공학과

Evaluation and Numerical Model of Hydraulic Resistance by Hanging Aquaculture Facilities

Jong Sup LEE and Il Heum PARK*

Dept. of Civil Eng., National Fisheries Univ. of Pusan, Pusan 608-737, Korea

* Dept. of Ocean Eng., National Fisheries Univ. of Pusan, Pusan 608-737, Korea

A numerical model of hydraulic resistance by hanging aquaculture facilities is developed and applied to a model basin and a field. A drag stress term formulated by the quadratic law of drag force is introduced in the equations of motion for a two-dimensional depth-averaged flow. In the model basin, numerical experiments are carried out for the various shape of obstructions, string density and layout of facilities etc.. The flow pattern around the facilities is affected sensitively by the density of string and the layout of facilities. On the other hand, the velocity decay due to the hanging oyster aquaculture facilities is observed in Kamak bay, where the maximum velocity decay rate is 25 % in spring tide. The model is also applied to the field, Kamak bay. The velocity decay rate in the model is comparable with the field measurement data. The velocity decreases around the down-stream area of the facilities, but it increases in the other region. The water elevation decreases during the flood and it increases during the ebb.

Key words : numerical model, drag force, hanging aquaculture facilities, velocity decay

서 론

연안 혹은 만 내에 설치된 양식시설물들은 해수의 소통에 영향을 미치는 유수저항을 유발시킨다. 이러한 유수저항은 양식시설의 밀도와 배치에 따라 달라지므로 양식장 내의 원활한 해수소통을 기하기 위해서는 양식시설의 적정한 밀도와 배치를 결정하는 것이 중요하다. 일반적으로 해수의 소통능은 양식장의 생산성과 노후화에 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다(Yoo, 1979; Lee, 1993).

수하식 양식시설은 수역을 입체적으로 이용하여 단위면적당 생산량을 증대시킬 수 있도록 종래의 투석식 혹은 송지식 양식법을 개선했던 것으로 양식물을 내려뜨린 수하연으로 패류를 양식하는 시설이다. 우리나라의 경우 1960년대에 접어들면서 땃목식의 수하식 양식시설이 보급되기 시작하였으며, 부력이 크고

취급이 간단한 발포 스티렌 부이의 개발로 1970년대 중반에는 연승식 시설로 대체되었으며, 연승식 시설은 내파성이 강하여 양식수면적을 만 외로까지 확장할 수도 있다(Yoo, 1979).

지금까지 우리나라에서 수하식 양식시설의 해양환경문제와 관련하여, 저질의 환경에 대하여 Cho and Kim (1978), Cho and Park (1983) 및 Cho et al. (1982) 등의 연구가 있으며, 수질에 대하여 Cho (1990), 양식밀도에 대하여 Cho (1980)의 연구가 있었다. 그리고 Lee (1993)는 가막만 굴 양식장의 해양학적 어장환경과 생산율 및 생산량과의 관계에 대하여 연구하였으며 특히, 가막만의 양식 굴 생산율이 해역에 따라 크게 다르며 이것은 해수의 소통능과 밀접한 관계가 있음을 시사하였다.

본 연구에서는 수하식 양식시설에 의한 유수저항에 관하여 해석하고자 한다. 이에 대하여, 유수저항을 수

하식 양식시설에 적용할 수 있도록 항력계수를 평가한 후, 항력을 응력의 차원으로 수심적분된 흐름의 운동방정식에 도입하여 교호방향음해법의 유한차분방정식을 구성하여 수치해를 구할 수 있도록 한다. 그리고, 수하식 양식시설의 적정밀도와 배치를 위한 기초자료를 제공하기 위하여 임의의 모형수조에서 다양한 종류의 cluster 형상, 수하연의 밀도 및 양식시설의 배치에 의한 유동장의 변화를 수치실험한다. 또한, 우리나라 굴 생산량의 29%를 차지하는 가막만에 본 모형을 적용하여 조류장의 변화에 대하여 토의하고자 한다.

항력을 고려한 흐름의 운동방정식

유수 중에 놓여진 물체에 의한 항력, F_D 는 압력항력과 마찰항력의 합으로 나타내며, 이러한 각 항력은 물체의 표면에서 압력강도와 전단응력을 정밀하게 측정하기가 곤란하므로 일반적으로 항력계수를 도입하여 식 (1)과 같이 유속에 관한 2차식으로 나타낸다.

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A_D \vec{U} |\vec{U}| \quad (1)$$

여기서, ρ 는 유체의 밀도, A_D 는 물체의 흐름방향에 대한 투영면적, \vec{U} 는 유속벡터 그리고 C_D 는 항력계수이다. 항력을 평가하기 위해서는 C_D 의 결정이 중요하며, C_D 는 주로 물체의 형상과 Reynolds 수, Re ,에 의존한다. 그리고, 물체가 유수 중에 여러 개 존재할 경우, 항력은 식 (2)와 같이 단위면적당 항력 즉, 응력의 차원으로 나타낼 수 있다.

$$\tau_D = \frac{n}{2} \rho C_D A_D \vec{U} |\vec{U}| \quad (2)$$

여기서, n 은 단위면적당 저항물체의 개수이다.

한편, Nakamura (1991)는 망시설의 활어조와 같은 양식시설에 의한 저항을 운동량의 차 혹은 저면마찰계수로 취급하여 양식시설 설치해역의 대표유속 혹은 대표유량을 산정하는 간략식을 제안하였으나, 양식시설을 포함한 전해역의 각 국지점에서 수위변화를 포함한 유동장의 변화는 해석하지 못하였다.

Boussinesq 근사를 행한 Reynolds 방정식과 연속방

정식을 연직방향으로 Leibnitz 부분적분하면, 다음과 같은 수심적분된 유체의 운동방정식을 얻을 수 있다 (Falconer, 1986).

$$\frac{\partial UH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} \right) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \tau_x dz - \varepsilon H \left(2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial VH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} \right) + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{1}{\rho} \int_{-h}^{\eta} \tau_y dz - \varepsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial UH}{\partial x} + \frac{\partial VH}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

여기서, t 는 시간, β 는 운동량 보정계수, U , V 는 x , y 방향의 수심평균유속, H 는 전수심, g 는 중력가속도, f 는 Coriolis parameter, η 는 해면변위, h 는 수심, τ_x , τ_y 는 x , y 방향의 전단응력 그리고 ε 은 수심평균된 와동점성계수이다.

식 (3), (4)의 전단응력항에 바람 및 저면에 의한 마찰을 고려하고, 식 (2)와 같은 양식시설에 의한 단위면적당 항력을 도입하면 다음의 식 (6), (7)과 같다.

$$\frac{\partial UH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial U^2 H}{\partial x} + \frac{\partial UVH}{\partial y} \right) - fVH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\rho_s D^* W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} + \frac{gU \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H^{1/3}} + \frac{n C_{Dx} A_{Dx} U \sqrt{U^2 + V^2}}{2} - \varepsilon H \left(2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (6)$$

$$\frac{\partial VH}{\partial t} + \beta \left(\frac{\partial UVH}{\partial x} + \frac{\partial V^2 H}{\partial y} \right) + fUH + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{\rho_s D^* W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho} + \frac{gV \sqrt{U^2 + V^2}}{C^2 H^{1/3}} + \frac{n C_{Dy} A_{Dy} V \sqrt{U^2 + V^2}}{2} - \varepsilon H \left(\frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + 2 \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial x \partial y} \right) = 0 \quad (7)$$

여기서, ρ_s 는 대기의 밀도, D^* 는 해면에서 계면저항

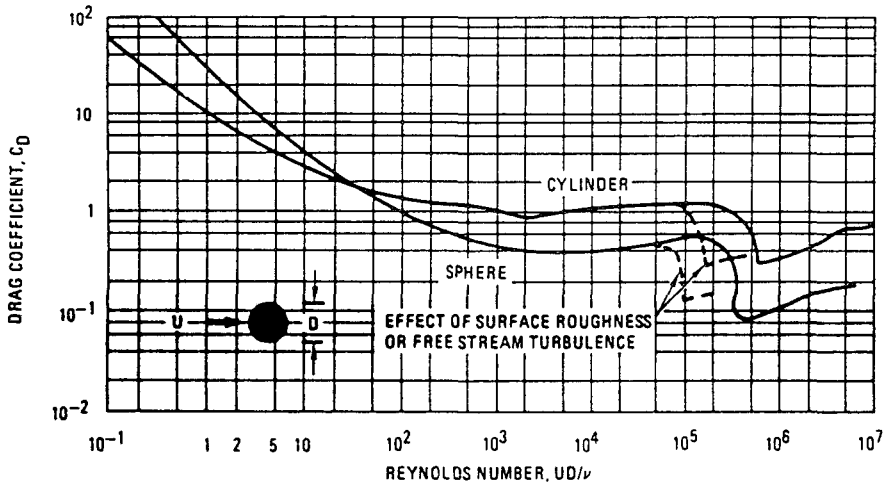


Fig. 1. Drag coefficient of a cylinder and a sphere according to Reynolds number (after Blevins, 1984).

계수, W_x, W_y 는 x, y 방향의 풍속, C 는 Chezy의 평균 유속계수, C_{Dx}, C_{Dy} 는 x, y 방향의 항력계수 그리고 A_{Dx}, A_{Dy} 는 x, y 방향의 물체의 투영면적이다.

상기의 식 (6), (7)의 7번째 항은 유수 중에 놓여진 물체에 의한 항력을 나타낸다. 따라서, 식 (6), (7)은 식 (5)와 더불어 양식시설에 의한 유수저항을 고려한 해수유동에 관한 기본방정식이 되며, 수치모형을 구성하여 수치해를 구할 수 있다. 수치계산방법은 식 (5)~(7)의 모든 항들을 공간 및 시간에 대하여 중앙차분을 취하여 ADI(Alternating Direction Implicit)법으로 계산하며, 공간적으로 staggered grid scheme을 사용하였다. 항력이 고려되지 않은 경우의 수치계산방법에 관하여는 Falconer(1986)와 Lee et al.(1994)의 논문을 참조바란다.

따라서, 물체의 형상이 결정된다면 항력계수의 평가가 가능해진다.

한편, 수하식 양식시설은 대개 패류를 대상으로 하고 있다. 대상으로 하는 패류의 종류에 따라 수하연에 달린 cluster의 형상이 상당히 다르며, 패류의 성장에 따라 그 크기가 상당히 차이가 난다. 수하식 양식의 대부분을 차지하는 굴의 경우, 성장된 껍질의 형태는 각고와 각장이 각각 70.8 mm, 46.8 mm(Bae and Bae, 1972) 정도이며, 한 개의 cluster에 부착하는 일반적인 굴 개체의 최대한계는 약 60개이며 부착수가 많아지면 개체의 크기가 작아지므로 알맞은 부착수는 20~30개이다(畠田·菊地, 1957). 가막만의 경우 Lee(1993)는 cluster 당 굴의 부착개수가 평균 20.2개(11.7~31.7)임을 제시하였다. 그러나, 수하식 양식시설의

항력계수의 결정

항력의 산정에 있어서 항력계수, C_D ,는 주로 Reynolds 수, Re ,와 물체의 형상에 의해 결정될 수 있다. Fig. 1은 원주와 구에 대한 C_D 를 Re 에 따라 도시한 그림이다. 그림에서처럼 난류인 경우 즉, $O(10^3) < Re < O(10^6)$ 인 유동범위에서는 C_D 가 거의 일정한 값을 가진다. 그리고, 대개 조류장의 경우, cgs 단위계에서 동점성계수가 $O(10^{-2})$, 길이 scale이 $O(10^1)$, 유속이 $O(10^1)$ 정도의 scale이므로 Re 는 $O(10^4)$ 값을 가진다.

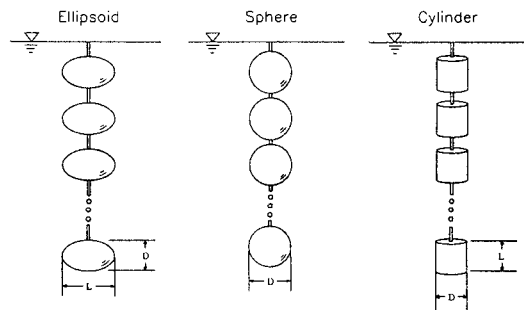


Fig. 2. Modelled cluster geometries of hanging aquaculture facilities.

cluster 형상과 그 크기에 관한 보고가 없으므로, 본 연구에서는 Fig. 2와 같이 단순화시킨 3가지의 3차원 형상 즉, 타원체, 구 및 원통과 같은 형상의 cluster에 관하여 검토하고자 한다. 그리고, Table 1은 타원체, 구 및 원통 형상의 3가지 물체에 관한 항력계수를 나타내고 있다.

한편, National Fisheries Administration (1991)에 의한 수하식 굴 양식시설의 최대시설기준은 수하연 간격 70 cm, 시설 20 대/ha이다. 그리고, Cho (1980)에 의하면 환산·거제만의 굴 양식밀도는 멧목식의 경우 0.24 연/㎡, 연승식의 경우 0.28 연/㎡이었으며, cluster 수는 3.09~8.94 개/㎡이었다.

유수저항에 관한 현장조사

수하식 양식시설에 의한 유속변화를 조사하기 위하여, 1994년 12월 19일~12월 20일(월령=16.1~17.1)의 약 18시간 동안 전라남도 여천군 가막만의 수하식 굴 양식시설(34° 39.5' N, 127° 41.7' E)에서 남북방향으로 150 m 떨어진 두 지점(Fig. 3의 St. CS 및 St. CN)에서 연속조류관측을 실시하였다. 조사방법은 굴 양식시설의 전면과 후면에 전자기유속계(ACM-16, ALEC CO.)를 해면 하 2 m 지점에 각각 설치하여

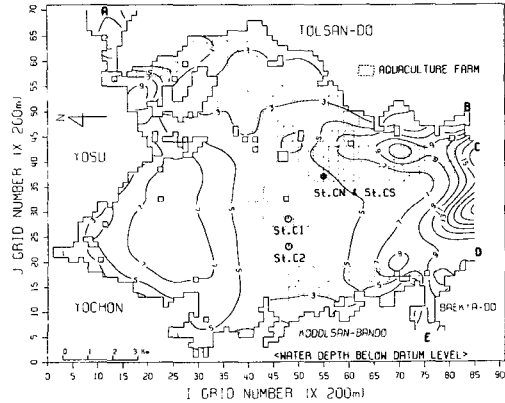


Fig. 3. Location of various stations and distribution of oyster farms in Kamak bay.

약 18시간 동안 1분 간격으로 수평유속 및 유향을 기록하게 하였다. Fig. 3에서와 같이 유속계 설치지점은 기준수준면(datum level)을 기준으로 수심이 약 5 m 정도의 일정한 곳이며 두 지점의 거리가 150 m 정도로 가까운 거리이므로, 수심변화 및 위상차에 의한 유속변화는 거의 없을 것으로 판단된다.

Fig. 4는 관측된 유속의 stick diagram을 나타낸다. 조사지점은 가막만의 지형특성으로 인하여 남북방향의 왕복류가 동서방향의 흐름보다 훨씬 우세하므로, 획득된 유속자료에서 북분유속만을 취하여 유속자료를 해석하였다. 유속이 1분 간격으로 기록되었으므로

Table 1. Drag coefficient for various bodies (after Blevins, 1984)

Shape	Reference Area	Drag Coefficient, C_D , and Remark
Sphere	$\pi D^2/4$	$0.41 [R_e = 10^3]$
		$0.39 [R_e = 10^4]$
		$0.52 [R_e = 10^5]$
		$0.12 [R_e = 10^6]$
Ellipsoid	$\pi D^2/4$	$0.44(D/L) + 0.016(L/D) + 0.016(D/L)^{1/2}$
		$[1 < L/D < 10]$ $[R_e < 2 \times 10^5]$
Cylindrical Rod	LD	$0.64 [L/D = 1.00]$
		$0.68 [L/D = 1.98]$
		$0.74 [L/D = 2.96]$
		$0.74 [L/D = 5.00]$
		$1.20 [L/D = \infty]$ $[R_e = 8.8 \times 10^4]$

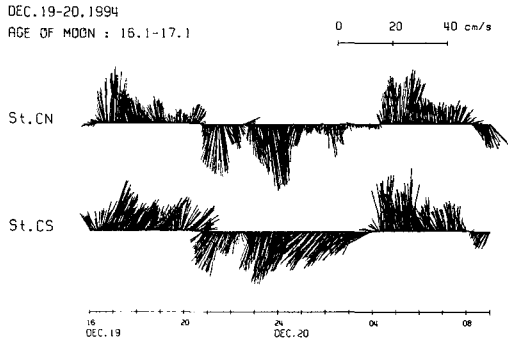


Fig. 4. Stick diagrams of tidal currents around the hanging oyster culture facilities in Kamak bay.

고주파수성분을 제거하기 위하여 Low Pass Filter를 이용하여 10분 이하의 단주기성분을 제거하였다. 그리고, 유향에 따른 상류측 유속과 하류측 유속을 재배열한 후 Fig. 5와 같이 나타내었다.

Fig. 5의 윗 그림과 가운데 그림은 양식시설의 북쪽(St. CN)과 남쪽(St. CS)에 설치된 유속계에서 획득한 각각의 북분유속성분이며, 아래 그림은 유향을 고려한 상류측과 하류측 유속차 즉, 양식시설에 의한 유속변화량이다. 그림에서처럼 전반적으로 상·하류측의 유속차가 뚜렷히 나타났으며, 하류측 유속의 크기는 상류측 유속에 대하여 최대 25% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 그러나, Fig. 4 혹은 Fig. 5의 St. CN의 유속자료에서 보듯이 하류측의 유속이 더 크게 나타나는 시간영역대(1994년 12월 20일 1시~4시)가 있는데 이것은 조류성분 외에 다른 영향에 기인된 것으로 사료된다.

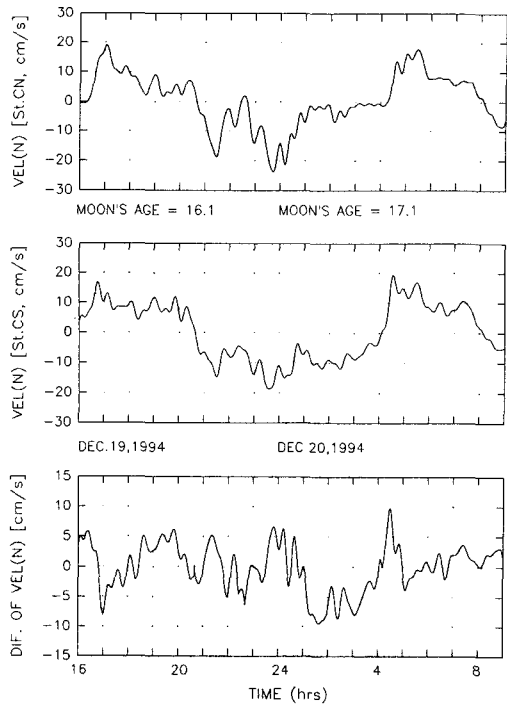


Fig. 5. Time series of north-component velocities and its difference between up-stream and down-stream.

모형수조에서 수치실험

cluster의 형상, 수하연의 설치밀도 및 양식시설의 배치에 따른 유동장의 변화를 해석하기 위하여, 상기의 수치모형을 이용하여 (600×600) m²의 모형수조에

Table 2. Experiment conditions for the flow field variation by the hanging aquaculture facilities

Run	Drag Coefficient, C_D	String Density, $n(ea/m^2)$	Shape	Layout of Facilities
0	None	None	None	None
I-1	0.33		Ellipsoid	1ha×1ea
I-2	0.45	0.25	Sphere	(located at center)
I-3	0.64		Cylinder	
II-1		0.125		1ha×1ea
II-2	0.64	0.250	Cylinder	(located at center)
II-3		0.500		
III-1				1ha×3ea(longitudinally)
III-2	0.64	0.25	Cylinder	1ha×3ea(transversely)
III-3				1ha×9ea(equally)

서 수치실험하였다. 실험조건은 Table 2와 같다. 계산 격자간격은 10 m이며, x 방향의 양단경계는 개경계로, y 방향의 양단경계는 폐경계로 처리하였으며, 개경계에서는 양식장이 설치되지 않았을 경우 수조 내에서 유속이 100 cm/s가 되도록 양단에서 수위경사를 주었으며, 수심은 5 m로 일정하게 하였다. 이 때, 흐름방향은 그림의 좌측에서 우측이다. 그리고, Fig. 6은 Run III-3과 같이 양식시설의 배치가 가장 복잡한 경우의 수치실험에 대한 수치해의 수렴정도를 검증한 것으로 모형수조 중심부의 격자점에서 연속적으로 출력된 수위와 유속값이다. 약 1,800회의 반복계산 후에는 완벽한 해의 수렴성을 보여주므로 전 경우에 걸쳐 계산결과와는 2,200회의 반복계산 후의 결과를 나타내었다.

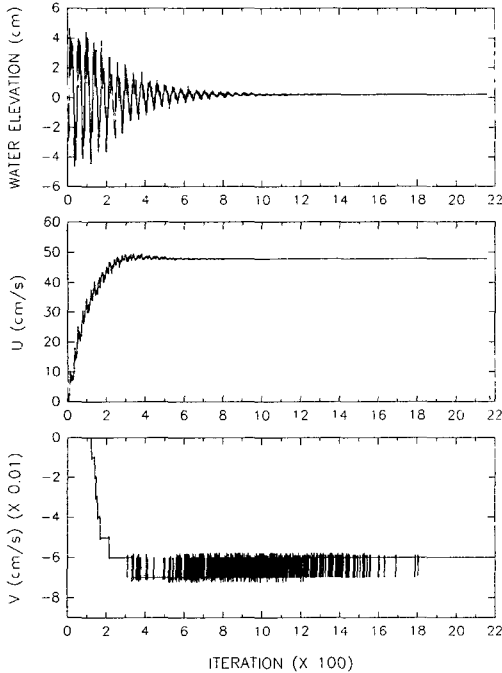


Fig. 6. Convergency test of numerical solutions in Run III-3.

1. Cluster 형상에 따른 변화(Run I-1~I-3)

Fig. 7은 cluster 형상(C_D 의 변화)에 따른 유동장의 변화를 나타낸다. Fig. 7의 위 그림은 수위, 가운데 그림은 x 방향의 유속 그리고 아래 그림은 y 방향의 유속을 양식시설 설치 전의 유동상태(Run 0)에 대한 상대적 크기를 백분율로서 나타낸 것이다. 단, 양식시

설 설치 전에는 y 방향의 유속이 없으므로 y 방향 유속의 변화량은 양식시설 설치 전의 x 방향 유속에 대한 상대적 크기로서 나타내었다.

그림에서처럼 C_D 의 값이 커질수록 흐름장의 변화가 크게 나타나고 있다. 수위변화는 cluster가 타원체(Run I-1)인 경우 최대 0.06% 정도의 증감이 있었으며, 구(Rin I-2)의 경우 0.08% 그리고 원주(Run I-3)의 경우 0.12% 정도로 나타났다. x 방향 유속의 변화는 양식시설 설치로 인하여 그 크기가 대체적으로 감소하고 있으며 특히, 양식시설 배후에서 유속이 크게 감소하며 양식시설의 양측면에서 속도경사가 크게 나타나고 있다. 유속의 최대감쇠율은 타원체의 경우 10%, 구는 16% 그리고 원주는 20% 정도의 값을 보였다. 또한, 양식장 설치로 인하여 y 방향 유속이 발생하였으며, 이 때 양식장을 중심으로 유향이나 유속의 크기가 서로 대칭적으로 나타난다. x 방향 유속에 대하여 y 방향 유속의 최대발생량은 타원체의 경우 2.0%, 구는 3.4% 그리고 원주는 4.0% 정도의 값을 보인다. 이와같이 y 방향 유속이 발생한 것은 유향이 변화한 것을 나타낸다.

2. 수하연의 설치밀도에 따른 변화

(Run II-1~II-3)

Fig. 8은 수하연의 설치밀도(n 의 변화)에 따른 유동장의 변화를 나타내고 있다. 그림의 배치는 Fig. 7과 동일하다.

기대되었던 것처럼 수하연의 설치밀도가 클수록 양식장 주변에서 유동장의 변화가 크게 나타나고 있다. 수위변화에 있어서 $n=0.125$ (Run II-1)인 경우 최대 0.08%, $n=0.25$ (Run II-2)인 경우 0.1% 그리고 $n=0.5$ (Run II-3)인 경우 0.22% 정도이다. 횡방향으로 수위는 양식장을 중심으로 변화양상이 대칭적이며 양식장 center line 부근에서는 수위의 변화가 거의 없으며, 종방향으로 양식장 전면에서는 수위가 급격히 상승하고 양식장 후면에서는 감소하는 양상을 나타내었다. x 방향 유속변화에 있어서, $n=0.125$ 인 경우 최대 10%, $n=0.25$ 인 경우 16% 그리고 $n=0.5$ 인 경우 34% 정도의 유속감쇠율을 나타내었으며, 일부 벽면경계 부근을 제외한 영역에서 전반적으로 유속이 감소하는 경향을 보인다. y 방향 유속에 있어서, 양식시설의 설치에 의해 대칭적으로 y 방향의 흐름이 발생하였으

수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수치모형

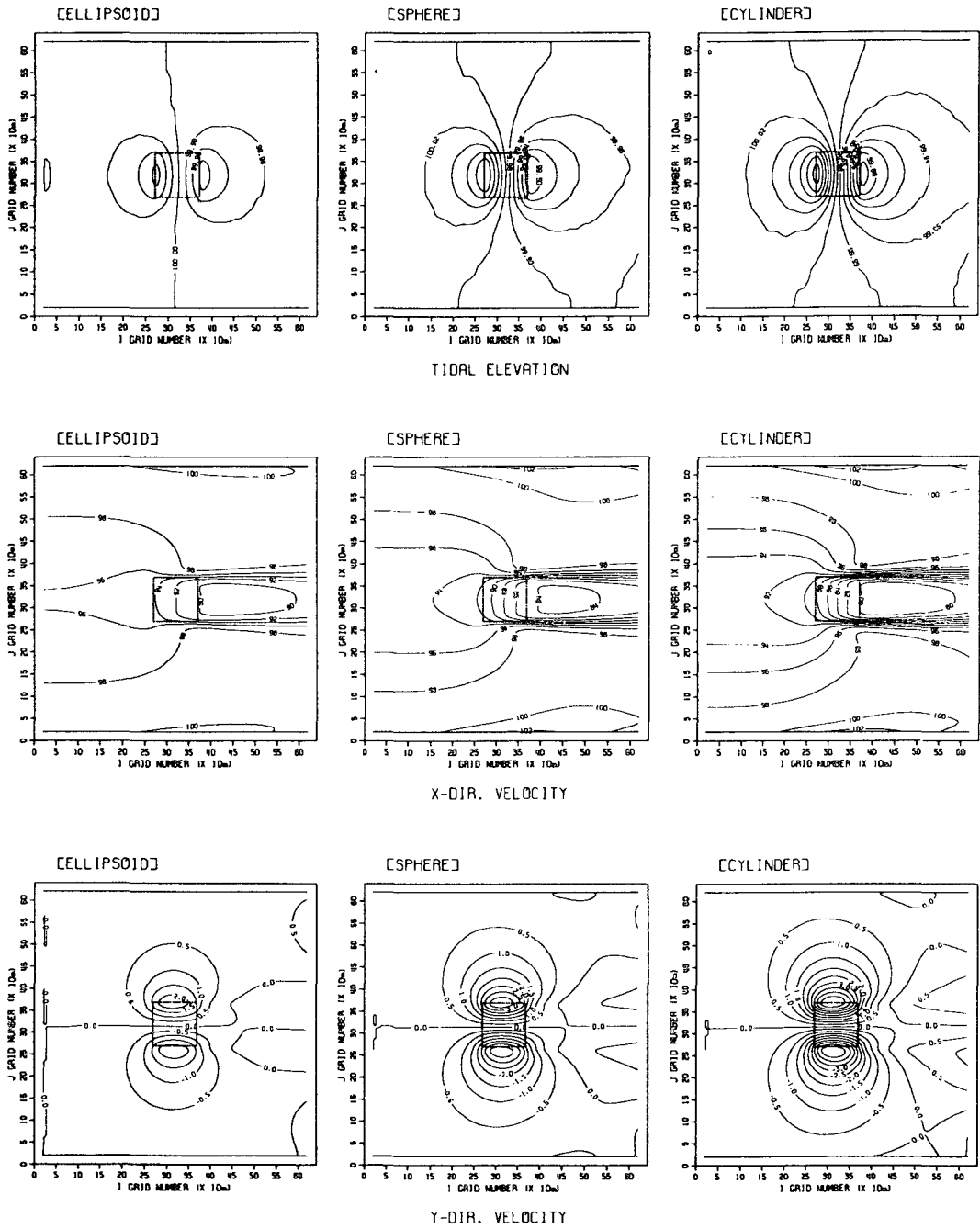


Fig. 7. Flow field variation according to the cluster geometry (Run I-1~I-3).
 (Upper: $\eta/\eta_0 \times 100$, Middle: $U/U_0 \times 100$ and Lower: $V/U_0 \times 100$)

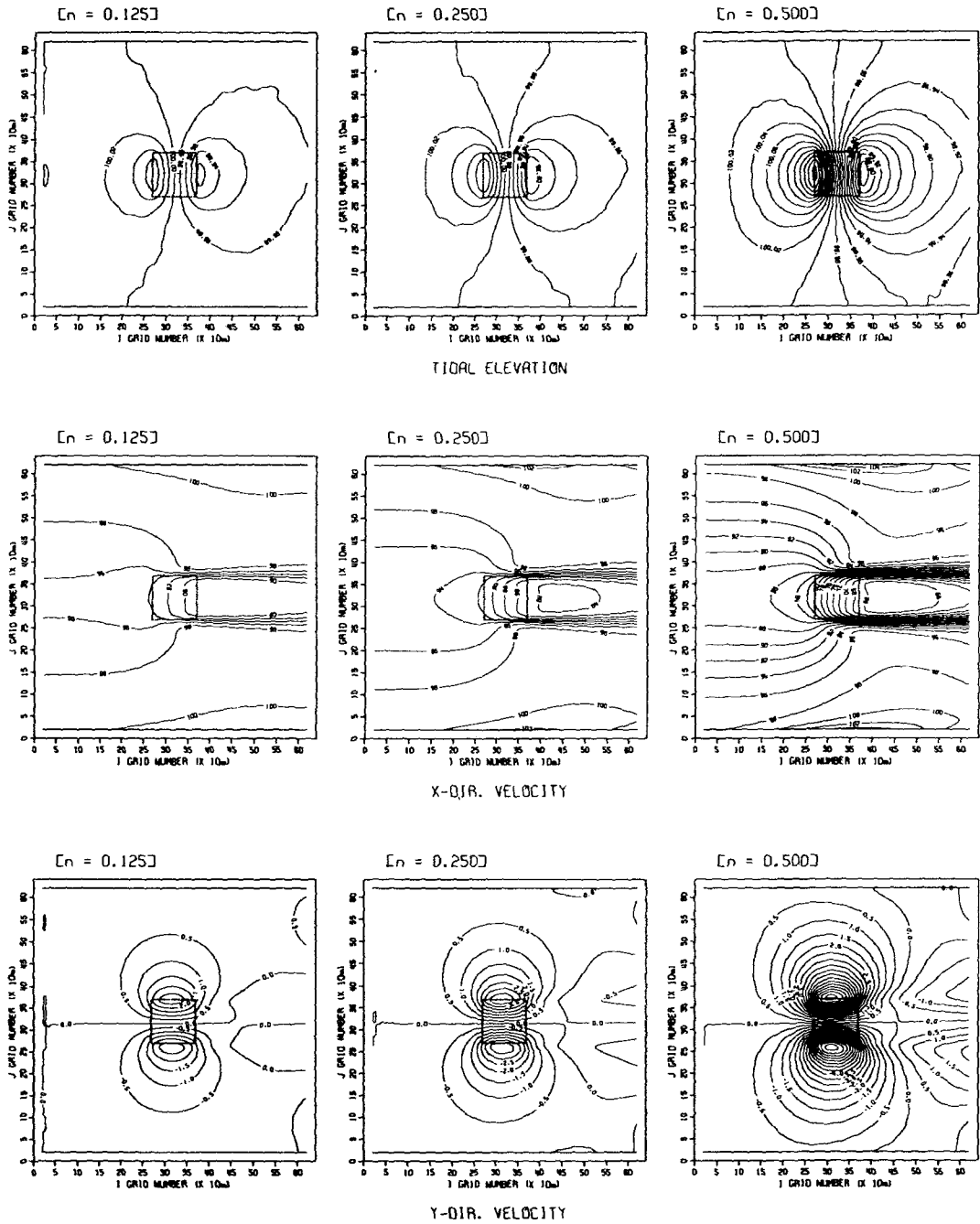


Fig. 8. Flow field variation according to the string density (Run II-1~II-3).
 (Upper: $\eta/\eta_0 \times 100$, Middle: $U/U_0 \times 100$ and Lower: $V/U_0 \times 100$)

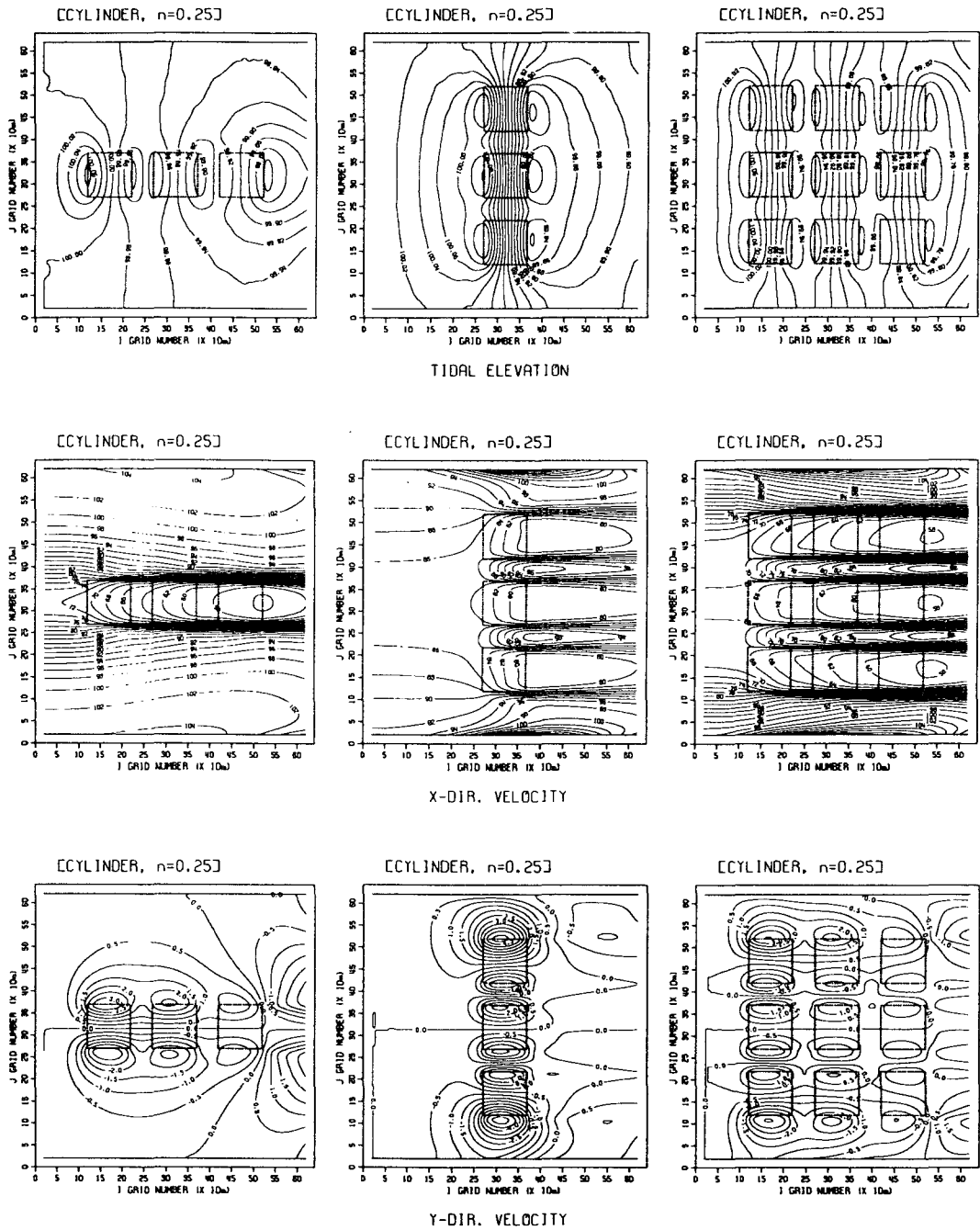


Fig. 9. Flow field variation according to the layout of facilities (Run III-1~III-3).
 (Upper: $\eta/\eta_0 \times 100$, Middle: $U/U_0 \times 100$ and Lower: $V/U_0 \times 100$)

며, $n=0.125$ 인 경우 양식시설 설치 전의 x 방향 유속에 대하여 최대 2.4%, $n=0.25$ 인 경우 3.4% 그리고 $n=0.5$ 인 경우 5.4% 정도의 유속발생율을 나타내었으며, n 값이 클수록 y 방향의 속도경사가 크게 나타난다.

3. 양식시설의 배치에 따른 변화 (Run III-1~III-3)

Fig. 9는 항력계수와 수하연의 밀도를 일정하게 주고 양식시설을 여러가지 형태로 배치한 경우의 유동장 변화를 나타내고 있다. 그림의 배치는 Fig. 7과 동일하다.

그림에서처럼 계산영역 내에서 양식시설의 배치를 조밀하게 하였을 경우 유동장의 변화가 크게 나타나고 있으며 그 변화양상은 상당히 복잡하게 나타난다. 양식시설을 x 방향으로 3개를 연속적으로 배치한 경우(Run III-1) 수위는 최대 0.06% 증가하고 0.16% 감소하였으며, y 방향으로 3개를 연속적으로 배치한 경우(Run III-2) 수위의 증감폭은 수조 가운데 한 개를 설치한 경우와 비슷하게 나타났으며, 9개를 등간격으로 설치한 경우(Run III-3) 수위는 최대 0.08% 증가하고 0.24% 감소하였다. x 방향 유속변화에 있어서, Run III-1의 경우 경우 최대 42%, Run III-2의 경우 20% 그리고 Run III-3의 경우 42% 정도의 유속감쇠율을 나타내었으며, 양식시설이 없는 벽면경계 부근 혹은 양식시설 사이에서는 양식시설 설치 전보다 유속이 증가하거나 유속의 경사가 아주 크게 나타난다. y 방향 유속에 대하여, 유속의 최대발생율은 양식시설의 양측면에서 나타나며 상류측이 하류측보다 크게 나타난다. Run III-1의 경우 y 방향 유속의 최대발생율

은 양식시설 설치 전(Run 0)의 x 방향 유속에 대하여 약 3.2%, Run III-2의 경우 4.8% 그리고 Run III-3의 경우 3.2% 정도로 나타났다.

모형의 현지적용

상기의 모형수조에서 수치실험결과를 토대로 본 모형을 전라남도 여천군 가막만에 적용하였다. Fig. 3과 같이 여수반도 남단과 돌산도에 둘러싸인 가막만은 남북방향의 길이가 약 15 km, 동서방향의 길이가 약 9 km인 타원형 내만이며 평균수심이 약 9 m인 천해로서 만의 용적이 $10.2 \times 10^8 \text{ m}^3$ 정도이다. 해저지형은 오목하게 수심이 깊은 북서 내만역, 만 중앙으로부터 남쪽으로 갈수록 차츰 깊어져 수심이 40 m에 이르는 남쪽 만 입구역 그리고 수심이 얕고 경사가 완만한 동부 천해역으로 구분된다. 또한, 이곳은 기초생산력이 매우 커서 서식생물이 다양할 뿐만 아니라 양식업이 성행하여 수산자원보존지역 및 청정해역으로 지정 보호하고 있다. 현재 양식어업 면허권수는 269건이 있으며, 그 중 약 100건의 수하식 굴 양식장에서는 전국 굴 생산량의 약 29%를 생산하고 있다(Lee, 1993).

가막만의 조류장에 대하여 Lee et al.(1994)은 조석의 주요 4분조를 고려하여 조류장을 재현한 바 있다. 이들이 사용한 가막만의 개경계에서 각 분조의 조화상수는 Table 3과 같으며, Table 3의 각 정점들은 Fig. 3에 도시되어 있다. 본 연구에서는 이들의 경계조건을 사용하여 가막만에서 양식시설에 의한 흐름장의 변화

Table 3. Tidal harmonic constants of open boundaries in Kamak Bay(after Lee et al., 1994)

St.	M_2		S_2		K_1		O_1	
	H_a^1	K^2	H_a^1	K^2	H_a^1	K^2	H_a^1	K^2
A	101	254	47	282	20	191	12	153
B	101	164	47	292	20	201	12	163
C	97	266	45	294	19	203	11	165
D	97	264	45	292	19	201	11	163
E	103	266	48	294	20	03	12	165

¹ amplitude in cm

² phase lag in degree

에 관하여 수치계산하며, 획득된 계산결과는 Lee et al.(1994)의 결과와 비교하였다.

Fig. 10은 Lee et al.(1994) 및 본 모형에 의해 계산된 양식시설의 설치유무에 따른 각 격자점에서 대조기의 조류타원도이다. 그림에서 화살표는 조석간차류이며 큰 타원은 반일주조류 그리고 작은 타원은 일주조류성분이다. 단, 양식시설에 관한 계산조건으로 완전히 성숙된 굴 개체의 크기(Bae and Bae, 1972; Lee, 1993)를 고려하여 cluster의 형상은 원주형($C_D=0.64$)으로 cluster 한 개당 투영단면적은 $(17.8 \times 17.8) \text{cm}^2$ 로 가정하였다. 이 때, 수하연으로 사용된 밧줄에 걸리는 항력도 밧줄을 길이가 긴 원주형 물체($C_D=1.0$)로 가정하여 그 영향을 고려하였다. 그리고, 수하연의 설치 밀도는 Cho(1980) 및 Lee(1993)의 조사결과를 토대로 $n=0.25 \text{ 연}/\text{m}^2$ 로 주었다.

Fig. 10의 경우 양식시설의 설치유무에 의한 유동변화를 파악하기 어려우므로, 대조기 창조류 및 낙조류 최강시의 양식시설 설치유무에 따른 유속차를 양식시설 설치 전의 유속과의 비율로 나타낸 것은 Fig. 11과 같으며, 같은 방법으로 수위의 변화를 나타낸 것은 Fig. 12와 같다. 그림에서 실선은 유속 혹은 수위가 감소한 경우이며, 점선은 유속 혹은 수위가 증가한 경우를 나타낸다. 유속의 경우 대체적으로 양식장이 설치된 영역에서 유속의 크기가 감소하며 그 밖의 영역에서는 증가하는 양상을 보여준다. 양식장 내 혹은 양식장 주변에서 대조기 창조류 최강시 유속의 최대 감소율은 30%, 최대증가율은 30% 정도이며, 낙조류 최강시 최대감소율은 30% 최대증가율은 20% 정도이다. 그리고, 양식장이 설치되지 않은 북서 내만역에서는 유속의 변화율이 거의 없다. 한편, 수위의 경우 양식시설의 저항에 의하여 만 내의 거의 전영역에서 창조시에는 수위가 감소하며, 낙조시에는 수위가 증가하는 양상을 보여준다. 그 크기는 양식시설 설치 전과 비교하여 북동해역에서 최대 2.0% 감소하였으며 그 밖의 해역에서는 0.2~0.4% 정도의 감소율을 나타내었다. 낙조류시에도 대부분의 해역에서 0.2~0.4% 정도의 수위증가율을 보이고 있으며, 북동쪽 해역에서 최대 0.9% 정도의 수위증가율을 보이고 있다.

양식시설 설치영역 내의 한 점(Fig. 3의 St. C1) 및 양식시설 설치영역 밖의 한 점(Fig. 3의 St. C2)에서 양식시설에 의한 유수저항의 고려유무에 따른 대조기

동안의 수위, 유속 및 이들의 편차값을 시계열로 나타낸 것은 Fig. 13~14와 같다. Fig. 13은 양식시설 설치영역 내에서의 결과이다. 식 (1)에서와 같이 항력은 유속의 제곱에 비례하므로 창·낙조류 최강시 수위 및 유속의 편차값이 크게 나타나며, 전류시에는 그 편차값이 거의 없다. 그리고, 수위의 경우 양식시설의 유수저항에 의한 위상차를 거의 찾아 볼 수 없으나, 유속의 경우 북분 및 동분유속 둘 다 양식시설에 의하여 위상이 다소 지연되며 유속의 크기도 감소하는 경향을 나타내었다. 한편, Fig. 14와 같이 양식시설의 설치영역 밖에서는, Fig. 13과 같이 유속이 강할 때 수위 및 유속의 편차값이 크게 나타나며 전류시에는 그 편차값이 줄어드는 결과를 나타내었다. 수위의 경우 Fig. 13과 유사한 위상차를 나타내었으나, 유속의 경우 Fig. 13의 결과와 반대적인 즉, 유수저항을 고려한 경우 유속의 위상이 빨라지며 유속의 크기도 증가하는 결과를 나타내었다. 이것은 유수저항의 고려유무에 관계없이 개경계에서 수위경계조건을 동일하게 취급한 것과 이에따라 연속방정식을 만족시키기 위하여 나타난 결과로 사료되며, 보다 정확한 해수유동상황을 재현하기 위해서는 양식시설에 의한 유수저항의 영향이 나타나지 않을 정도의 거리를 가진 곳에서 개경계의 설정, 이것이 어려울 경우 양식시설 설치 후 장기간 수위관측을 통한 개경계조건 설정이 요구된다. 그러나, 이러한 것을 고려하여 임의의 해역을 모형화하여 수치계산할 경우, 개경계의 격자점 수가 많을수록 일반적으로 해의 정도가 저하되므로 적절한 개경계역의 설정 및 개경계조건 선택에 신중을 기하여야 할 것으로 판단된다.

상기와 같이 양식시설 설치유무에 따라 해수유동의 변화양상이 크게 나타나고 있다. 그러나, 지금까지 대부분의 연구에서는 천해에서 해수유동의 수치계산시 이와같은 양식시설물에 의한 흐름 저항은 고려되지 않았는데, 본 연구의 양식시설에 의한 항력을 고려한 모형에 의한 수치계산 결과 유속의 크기에 대하여 그 영향이 현지에서 최대 30% 정도로 크게 나타나고 있으며 유향과 수위에 있어서도 그 영향이 나타났다. 따라서, 양식시설이 설치된 천해역과 내만역에서는 이로인한 유수저항의 영향을 고려하여 해수유동을 계산하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 그러나, 항력을 고려할 때 필요한 기본적인 자료인 양식시설물의

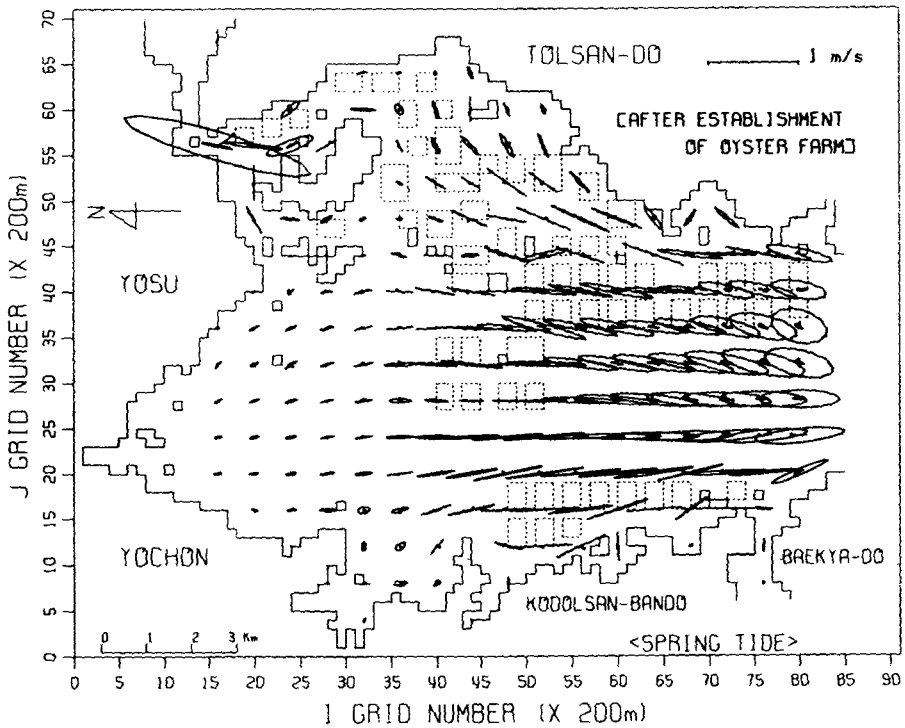
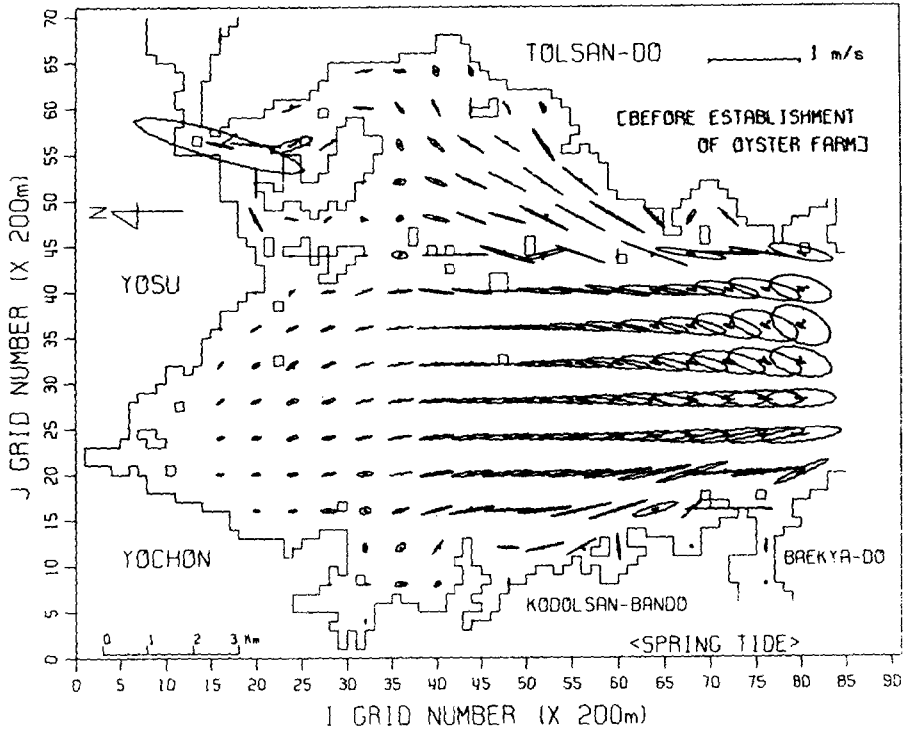


Fig. 10. Calculated tidal current ellipses before and after establishment of oyster farm during spring tide.

수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수치모형

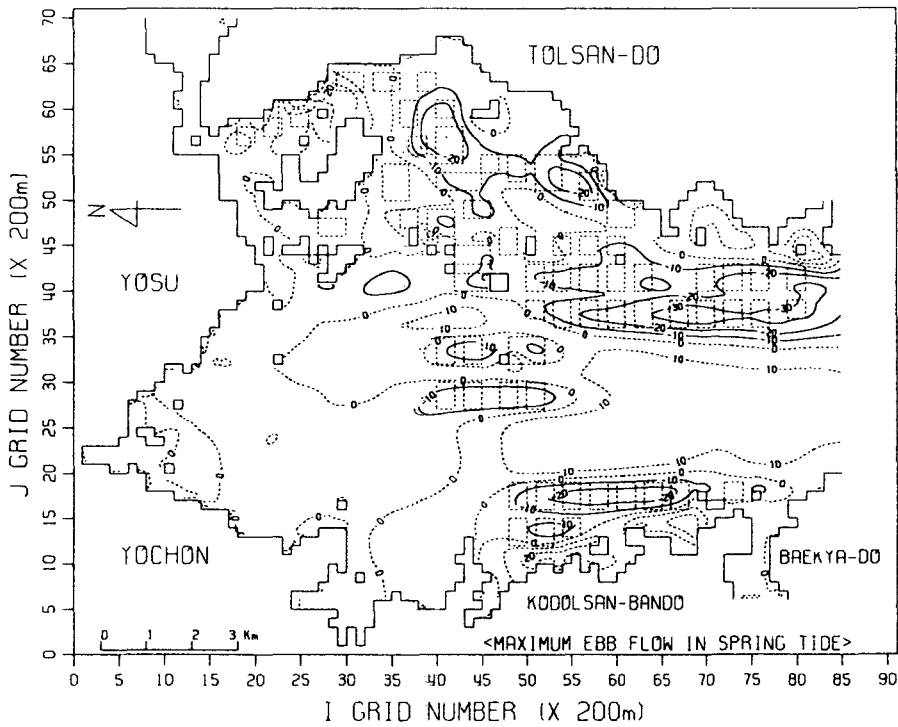
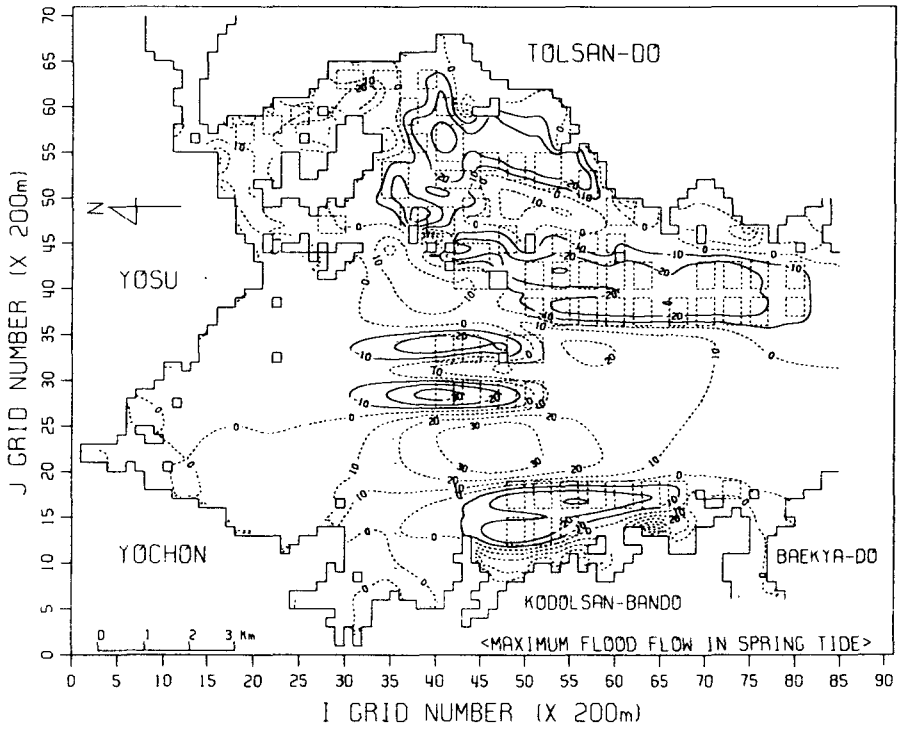


Fig. 11. Rate of velocity difference before and after establishment of oyster farm at maximum flood and ebb flow in spring tide.

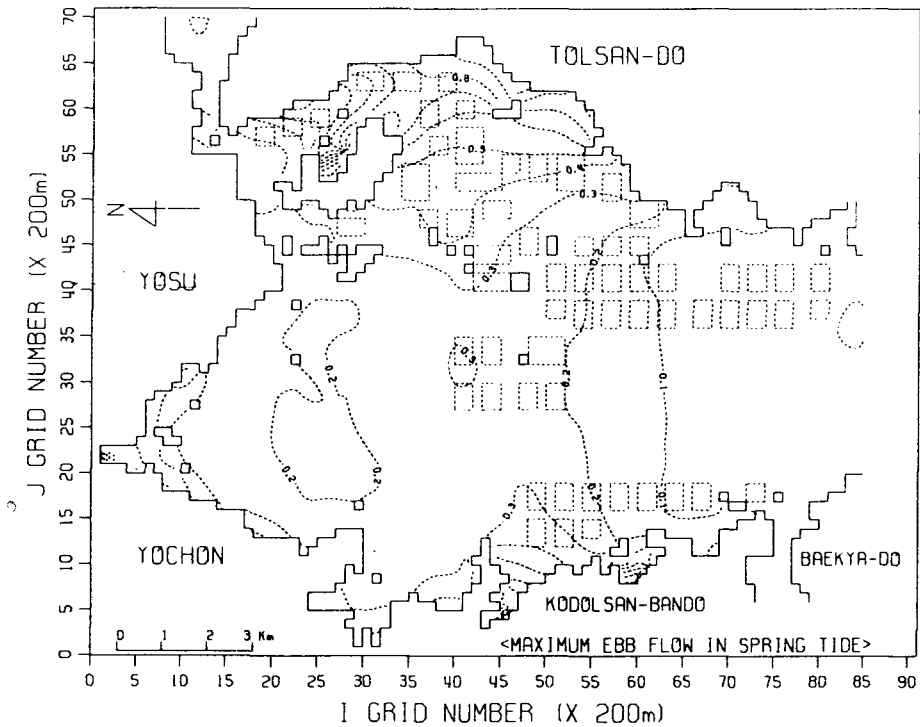
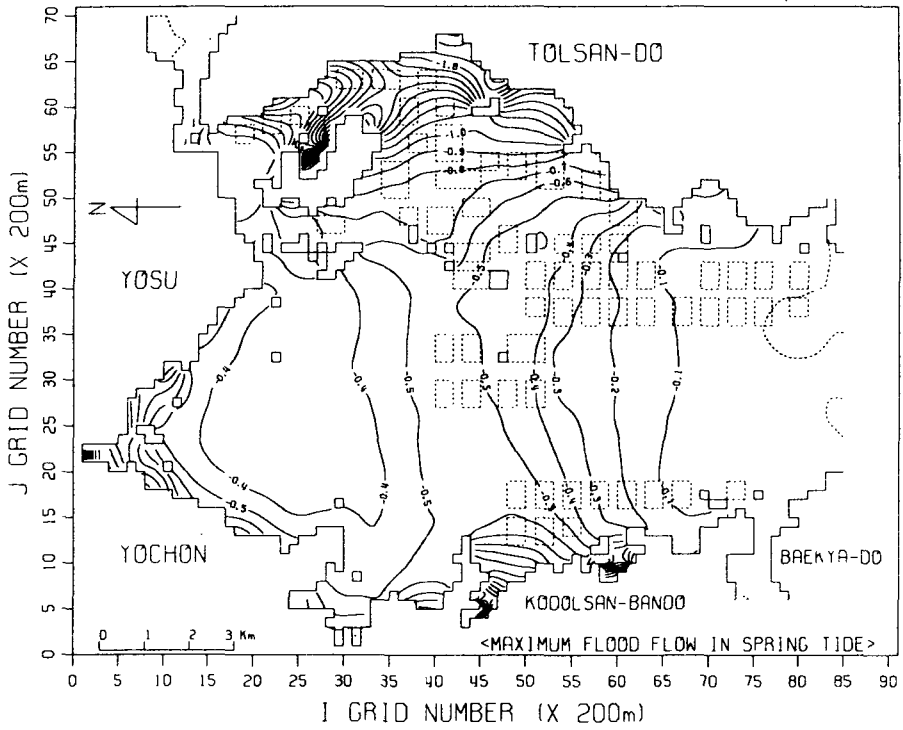


Fig. 12. Rate of tidal elevation difference before and after establishment of oyster farm at maximum flood and ebb flow in spring tide.

수하식 양식시설에 의한 유수저항의 평가와 수치모형

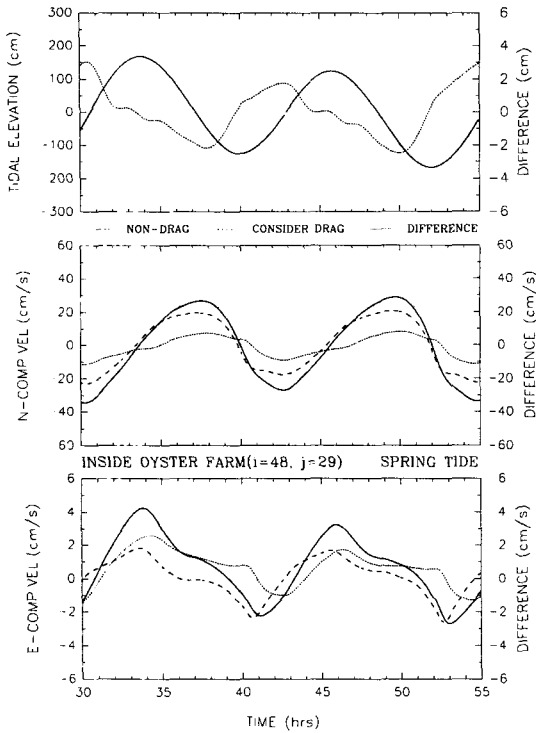


Fig. 13. Time series of tidal elevations, velocities and their differences inside facilities before and after establishment of oyster farm during spring tide.

설치영역, 대상으로하는 양식생물의 종류 및 성장정도 등에 대한 표준적인 자료가 없어서 이러한 제자료의 선택이 어려운 점으로 남아있으며 앞으로 이에대한 체계적인 연구가 요망된다. 또한, 연안역에서 수산생물의 생산성 향상과 관련하여 양식시설의 설치에 따른 각 해역의 해수유동의 편동을 고려한 양식시설의 적정한 설계기준과 설치밀도 등에 관한 체계적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

결론 및 토의

수하식 양식시설에 의한 유수저항을 평가하고 수치모형을 구성하여 임의의 모형수조 및 현지에 본 모형을 적용하여 이에 따른 유동변화를 토의하였다. 이상의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 수하식 양식시설이 설치된 조류장에서 R_n 는

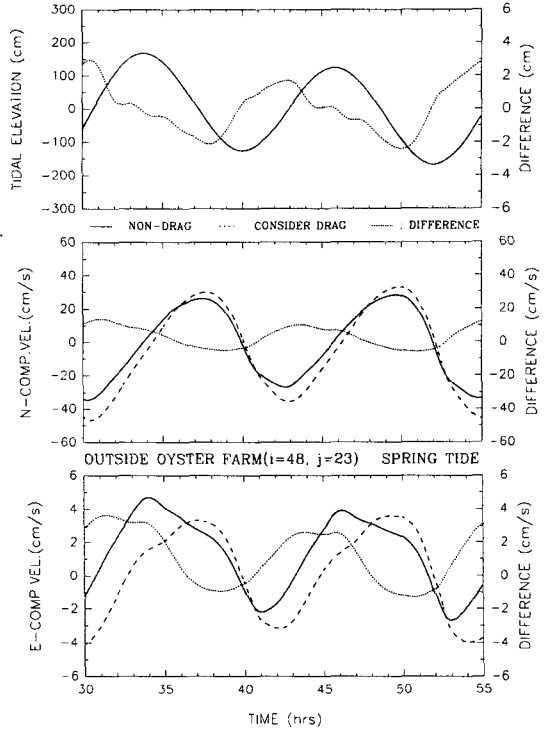


Fig. 14. Time series of tidal elevations, velocities and their differences outside facilities before and after establishment of oyster farm during spring tide.

$O(10^4)$ 이므로, 항력계수를 일정한 값으로 취급하는 것은 가능하다. 따라서, 저항물체에 의한 항력은 항력계수를 도입한 식으로 평가가능하며, 본 연구에서는 수하연의 단위면적당 설치밀도를 고려한 단위면적당 항력을 흐름의 운동방정식에 도입하였다.

(2) 가막만의 수하식 굴 양식장에서 유속변화를 현지조사한 결과, 유형에 따른 상·하류측 유속차가 뚜렷히 나타났으며, 양식시설 하류측 유속의 크기는 상류측 유속에 대하여 최대 25 % 정도 감소하는 것으로 나타났다.

(3) 수치모형에 의한 모형수조에서 cluster의 형상, 수하연의 설치밀도 및 양식시설의 배치에 따라 유동장의 변화가 민감하게 나타났다. 유속의 경우 양식시설 배후의 하류측 영역에서 x 방향 유속의 감소율이 크게 나타나며 상류측 영역에서 y 방향 유속의 생성율이 크게 나타났다. 수위의 경우 양식장 상류측에서 상승하고 하류측에서 감소하는 경향을 보이며

양식장 내에서는 수위경사가 비교적 크게 나타났다.

(4) 본 모형을 가막만에 적용한 결과, 양식시설에 의한 유동장의 변화가 크게 나타났으며 대조기 창조류 최강시 유속의 최대감소율은 30%, 최대증가율은 30% 정도이며, 낙조류 최강시 최대감소율은 30% 최대증가율은 20% 정도이다. 그리고, 수위의 경우 전반적으로 창조시에는 수위가 감소하며, 낙조시에는 수위가 증가하는 양상을 나타내었다. 또한, 유수저항을 고려한 경우 양식시설 내에서 유속의 위상은 다소 지연되며 양식시설 밖에서 유속의 위상은 빨라진다. 그러나, 수위의 위상변화는 미소하게 나타났다.

(5) 상기의 결과처럼 양식시설 설치유무에 따라 해수유동의 변화양상이 크게 나타난다. 따라서, 천해 혹은 내만에서 해수유동의 수치계산시 이러한 양식시설로 인한 유수저항의 영향을 고려하여 계산하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 지원 해양산업개발연구소에서 지원한「연안 굴 양식어장의 환경용량 증진을 위한 기술개발」에 관한 연구결과의 일부이며, 이에 당 연구소에 감사를 드립니다. 아울러 현지조사를 위하여 전자기유속계를 빌려주신 여수수산대학교 해양학과 이규형 교수님과 해양생산학과 김동수 교수님 그리고 현지조사에 참가하여 귀중한 조언을 해주신 여수수산대학교 해양토목공학과 이문옥 교수님에게 사의를 표합니다.

참 고 문 헌

- Bae, G. M. and P. A. Bae. 1972. Studies on suspended culture of oyster, *crassostrea gigas*, in the Korean coastal waters. Bull. Fish. Res. Dev. Agency, 9, 71~84 (in Korean).
- Blevins, R. D. 1984. Applied fluid dynamics handbook. Van Nostrand Reinhold Company Inc., 279~381.
- Cho, C. H. 1980. Farming density of oyster in Hansan-Geoje bay. Bull. Korean Fish. Soc., 13(2), 45~56 (in Korean).
- Cho., C. H. 1990. Self-pollution in nearshore culture farm. Proc. 3rd Seminar, Res. Center of Ocean Ind. Devel., Nat'l Fish. Univ. Pusan, 33~37.
- Cho., C. H. and K. Y. Park. 1983. Eutrophication of bottom mud in shellfish farms, the Goseong-Jinhae bay. Bull. Korean Fish. Soc., 16(3), 260~264 (in Korean).
- Cho. C. H. and Y. S. Kim. 1978. Environment in the oyster farm area - Superficial mud characteristics near Chungmu-. Bull. Korean Fish. Soc., 11(4), 243~247 (in Korean).
- Cho., C. H., H. S. Yang, K. Y. Park and M. K. Youm. Study on bottom mud of shellfish farms in Jinhae bay. Bull. Korean Fish. Soc., 15(1), 35~41 (in Korean).
- Falconer, R. A. 1986. A two-dimensional mathematical model study on the Nitrate levels in an inland natural basin. Proc. Inter. Conf. Water Quality Modellings in the Inland Natural Environment, BHRA, Fluid Engineering, Boummouth, Paper J1, 322~344.
- Lee, G. H. 1993. Fisheries oceanographical studies on the production of the farming oyster in Kamak bay. Ph.D. Thesis, Dept. of Oceanography, Nat'l Fisheries Univ. Pusan, 180p. (in Korean).
- Lee, M. O., J. S. Lee and I. H. Park. 1994. The impact of reclamation on physical environment for culture ground in a small bay. Proc. Inter. Conf. Hydrodynamics '94, Wuxi, China, 567~573.
- Nakamura, M. 1991. Fisheries Civil Engineering. Kogyo Sisa Pub. Co., Japan, 514~516 (in Japanese).
- National Fisheries Administration. 1991. A code of fisheries. 915p. (in Korean).
- Yoo, S. K. 1979. Shallow water farming. Saero Pub. Co., 133~151 (in Korean).

合田專治・菊地省吾. 1957. 垂下式カキの養殖密度効果に関する研究, 第一報 原板内の個體密度效果. 東北區水研報, 9, 133~142.

1995년 7월 11일 접수
1995년 9월 12일 수리