

육상 수조식 양식장의 유입 유량 변화에 따른 온도와 속도의 특성

김세현* · 신유식* · 전유신* · 서종수* · 정효민[†] · 정한식**

Temperature and Velocity Characteristics in a Land Aquaculture Tank with a Various Inlet Flowrates

Se Hyun Kim*, You Sik Shin*, You Sin Jun*, Jong Soo Seo*,
Hyo-Min Jeong[†] and Han-Shik Chung**

Key Words: Flow rate(유량), Land aquaculture tank(육상 수조식 양식장), Numerical analysis(수치 해석), Standard $k-\epsilon$ model(표준 $k-\epsilon$ 모델)

Abstract

This study was performed to analyze the velocity and temperature distributions of the land aquaculture tank for fish breeding. In this study, we analyzed the velocity and temperature distributions in aquarium tank, and the finite volume method and standard $k-\epsilon$ turbulence model with the SIMPLE computational algorithm are used to study the water flow in the aquarium. The main calculation parameters of the aquarium tank are the inlet flow rate with from 0.5 to 2.0L/M..

기호설명

Q : 유입 환수량

T : 온도

U_i : 시간평균속도

u_i : 변동속도

X_i : 공간좌표

δ_{ij} : kronecker Delta

ϵ : 난류에너지 소산율

μ_t : 와점성계수

ρ : 밀도

σ : Prandtl 수

σ_t : 난류 Prandtl 수

그리스문자

β : 체적팽창계수

1. 서론

최근 해산 생물 양식이 발전하는 가운데 여러 가지 환경문제가 발생하고 있다. 가장 심각한 문제는 연안 생태계의 파괴이다. 사회가 급속히 산업화, 도시화, 대형화되면서 해양환경 오염에 적신호를 부르고 있다. 예를 들면, 대규모 양식지역에서도 유기물, 무기물의 대량 폐기물이 발생하고, 이에 따른 부영양화, 무산소 저질의 형성, 생

[†] 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소

E-mail : hmjeong@nongae.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3184 FAX : (055)640-3188

* 경상대학교 대학원

** 경상대학교 기계항공공학부 · 해양산업연구소

물상의 변화, 산성화, 생물의 다양성 저하, 오염에 강한 내성종 증가, 적조 발생 등이 일어나 자원의 생산성과 품질이 저하하는 현상이 나타난다.⁽¹⁾ 이처럼 유용 수산 생물은 자연상태에서 서식하는 종을 종묘 생산하여 산업적으로 이용하는 것으로 종마다 고유의 특성을 가지고 있다.

이러한 현상을 극복하기 위한 양식시설 중에서 지형에 큰 제약을 받지 않고 적조현상 등에도 영향을 받지 않는 육상 수조식 양식장은 수산업계에서 큰 발전이 요구된다. 육상 수조식 양식장은 폐공간에 해수를 유입시켜 순환시키는 기본적인 특성을 가지는 관계로 약간의 부주의 및 잘못된 설계는 양식어의 폐사에 큰 영향을 끼친다. 또한 각각의 어종별로 맞는 수온, 수심, 조석, 유속 등이 있으며 이는 양식생물의 산란 및 부화, 섭식, 성장 및 성숙에 큰 영향을 미친다. 이러한 조건은 사계절에 무관하게 유지하는 것이 매우 힘든 동시에 해결해 나가야 할 과제이다.⁽²⁻⁵⁾

현재 양식장의 최적 설계에 관한 문제는 공학적인 전문지식이 요구되는 관계로 거의 전무한 실정이고, 양식장에서의 어군 행동에 관한 연구가 대부분을 차지하고 있다.^(6,7)

따라서 본 연구에서는 양식환경을 인위적으로 맞추는데 있어 경제적 손실 및 어류성장에 유리한 최적환경을 구축하기 위하여 열·유체 공학적인 측면에서 수치해석을 통하여 육상 수조식 양식장내의 양식장 환경을 개선하고자 한다.

2. 수조의 모델

Fig. 1은 수조내의 유동을 조사하기 위한 실험 모델 수조를 나타낸다. 수조의 크기는 가로, 세로 0.2m 이고 높이가 0.1m 이며 수조내의 유동은 폐회로 순환으로 구성되어 있다.

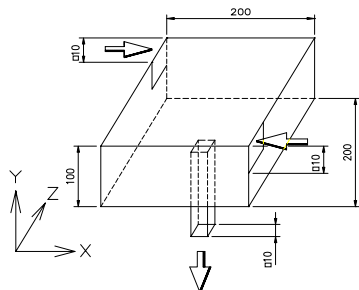


Fig. 1 Schematic diagram of numerical model for aquarium tank

상단부의 물이 유입되는 두 입구는 가로, 세로 0.01m이고 하단부의 물이 유출되는 출구는 정 중앙에 위치하며 가로, 세로 0.01m로 되어있다. 그리고 유입구측에 유입되는 물은 20℃로 하였으며 유량을 0.5L/M, 1.0L/M, 2.0L/M로 변화시켰을 경우 수조내의 온도 및 속도분포에 관하여 수치해석을 수행하였다.

3. 수치해석

3.1 지배방정식

수조내의 유동은 유입수의 온도와 대기와의 온도차가 반드시 존재하므로 이에 관한 정확한 계산을 위해서 온도차에 의한 부력의 영향을 고려하고 정상상태, 비압축성을 가정한 3차원 난류유동으로 가정한 지배방정식은 다음과 같다.

연속방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (1)$$

운동량방정식

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho U_i U_j)}{\partial X_j} \\ &= -\frac{\partial P}{\partial X_i} + \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\mu \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \right] \\ & - \frac{\partial}{\partial X_j} [\rho u_i u_j] + \delta_{ij} \rho g \beta \Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

3.2 난류모델의 선정

난류 유동장에서는 시간평균속도가 벽 근처에 있어서는 큰 기울기를 가진다. 난류계산을 할 경우 이러한 벽 근처의 점성저층까지 포함하여 벽면까지의 상세한 계산을 위하여 제안된 저 레이놀즈 수 모델(Low Reynolds Number model)이 있다. 이 저 레이놀즈 수 모델의 대표적인 것으로서 Launder^(8,9), Rodi⁽¹⁰⁾ 등에 의한 모델이 폭넓게 사용되고 있다. 이 모델은 벽면 근처에서 작은 차분간격을 설정하지 않으면 정확한 계산치를 얻을 수 없는 큰 단점도 지니고 있다. 그래서, 본 연구에서는 벽면의 효과를 충분히 고려할 수 있는 벽 법칙을 이용하여 벽에서 가장 가까운 격자점에 대하여 벽함수를 적용시켜 계산을 행한다.

난류모델로서는 공학적으로 그 가치가 인정되

어 폭넓게 사용되고 있는 표준 $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다.⁽¹¹⁾

위 식의 운동량 방정식에서 $-\rho \overline{u_i u_j}$ 는 레이놀즈 응력으로서 평균속도 기울기의 함수로 가정한다. 즉, Boussinesq의 와점성의 가정을 채택하여, 다음과 같이 레이놀즈 응력을 모델링한다.

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (3)$$

여기서, 대문자 U 는 평균속도, 소문자 u 는 변동속도 성분을 나타낸다. 또한, μ_t 는 와점성 계수로서 층류의 점성계수와는 달리 물성치가 아니며 오히려 난류의 구조에 의존하는 양으로서 다음식과 같이 모델링한다.

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k^2}{\epsilon} \quad (4)$$

이 와점성계수는 다음식 2개의 $k-\epsilon$ 수송 방정식으로부터 구해진다.

난류에너지방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j k)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} + \mu \right) \frac{\partial k}{\partial X_j} \right] + G - \rho \epsilon - g\beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial X_2} \quad (5)$$

난류에너지 소산 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j \epsilon)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} + \mu \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial X_j} \right] + C_1 \frac{\epsilon}{k} G - C_2 \rho \frac{\epsilon^2}{k} - g\beta \frac{\mu_t}{\sigma_t} \frac{\partial T}{\partial X_2} \quad (6)$$

여기서 난류생성항 G 는 다음과 같다.

$$G = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial X_j} + \frac{\partial U_j}{\partial X_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial X_j} \quad (7)$$

이상에서 난류의 유동장이 구해지면 다음 식의

온도에 관한 에너지식을 이용하여 수조내의 온도 분포를 계산할 수 있다. 즉,

에너지 방정식

$$\frac{\partial(\rho U_j T)}{\partial X_j} = \frac{\partial}{\partial X_j} \left[\left(\frac{\mu}{Pr} + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial T}{\partial X_j} \right] \quad (8)$$

또한, 위의 방정식에서 사용된 모델정수는 다음과 같은 값을 사용하였다.

$$\begin{aligned} C_1 &= 1.44 & C_2 &= 1.92 & \sigma_\epsilon &= 1.3 \\ \sigma_k &= 1.0 & C_\mu &= 0.09 & \sigma_t &= 0.7 \end{aligned} \quad (9)$$

3.3 경계조건 및 수치계산법

위의 지배방정식을 풀기 위하여 사용된 경계조건은 입구측의 유량을 0.5L/M, 1.0L/M, 2.0L/M로 하였으며, 유출구에 대하여서는 출구의 방향과 수직인 모든 변수의 기울기는 항상 0이 되는 Neumann조건으로 하였다.

이상의 경계조건과 주어진 방정식으로부터 각각의 변수를 구하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method)을 채택하였으며, 압력항의 계산은 SIMPLE 알고리즘을 채택하였고, 격자분할은 비등간격 엇갈림 격자계로서 격자수는 $X \times Y \times Z = 36 \times 36 \times 36$ 으로 하였다.

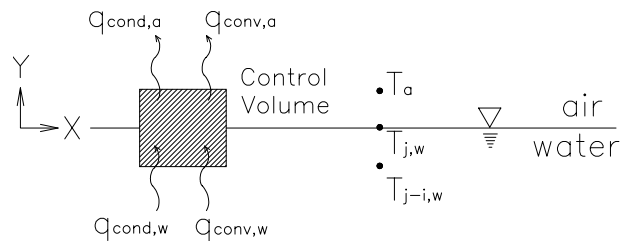


Fig. 2 Free surface boundary condition

Fig. 2는 자유표면에서의 경계조건을 나타낸 것으로 검사체적에서는 에너지보존법칙이 성립한다.

에너지 평형 조건

$$(q_{cond} + q_{conv})_w = (q_{cond} + q_{conv})_a \quad (10)$$

$$-K_w A \frac{dT}{dy} + h_{c,w} A (T_{j-1,w} - T_{j,w}) \quad (11)$$

$$= -K_a A \frac{dT}{dy} + h_{c,a} A (T_{j,w} - T_a)$$

열전달 계수

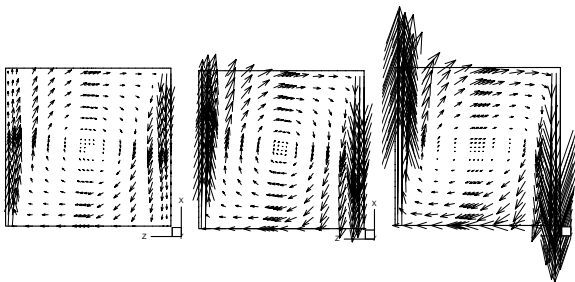
$$K_w = 0.6 \quad K_a = 0.026$$

$$h_{c,w} = 50 \quad h_{c,a} = 20 \quad (12)$$

위의 식(11)을 사용하여 에너지 평형 조건에서 $T_{j,w}$ 를 구할 수 있다.

4. 결과 및 고찰

4.1 속도 분포



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$
Fig. 3 Distributions of velocity vectors at near top of X-Z plane, $Y=0.095m$

Fig. 3은 X-Z평면 $Y=0.095m$ 인 물의 표면 근처에서 유량이 각각 $0.5L/M$, $1.0L/M$, $2.0L/M$ 일 때를 나타낸 것이다. 유입 유량이 많을수록 표면 근처에서는 타원형 형태의 유동현상을 나타내고 있다. 이는 유속증가에 의한 관성력의 영향이 클 것으로 판단된다.

Fig. 4는 X-Z평면 $Y=0.095m$ 인 지점에서 X축을 기준으로 했을 때 수조내의 벽면근처($X=0\sim0.05$)로 갈수록 속도가 빨라지는 것을 확인할 수 있다. Z축을 기준으로 했을 때는 유입속도가 변함에 따라 벽면근처에서 큰 변화가 있지만 내부면($Z=0.05\sim0.15$)에서는 거의 동일한 분포를 보였다.

Fig. 5는 X-Z평면 $Y=0.003m$ 인 수조 바닥 근처에서의 속도 분포이다. 유입유량이 많을수록 벽면 근처에서 생기는 선회류의 형태가 강해지는 것을 볼 수 있다.

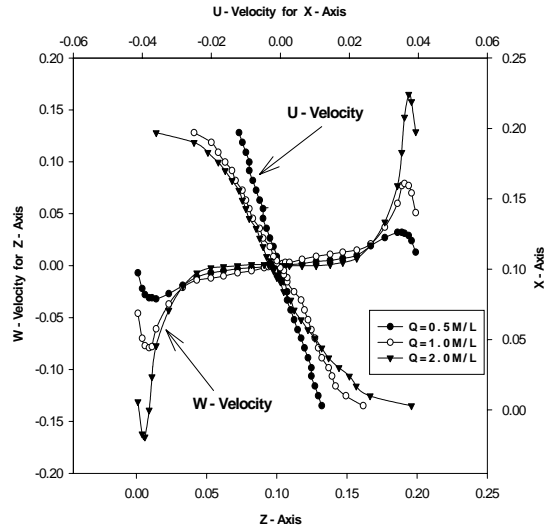
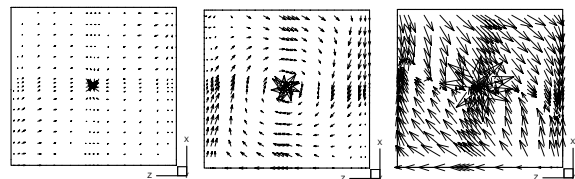


Fig. 4 Velocity distributions with variation of flow rates($X=0.1m$ $Y=0.095m$)



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$
Fig. 5 Distributions of velocity vectors at near Bottom of X-Z plane, $Y=0.003m$

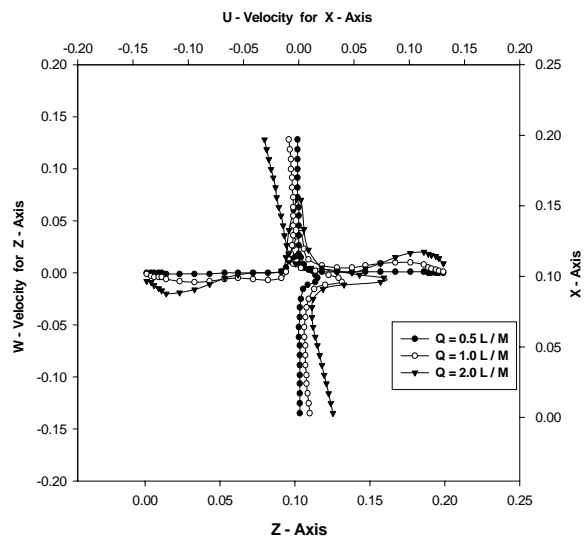
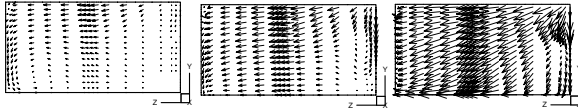


Fig. 6 Velocity distributions with variation of flow rates($X=0.1m$ $Y=0.003m$)

Fig. 6은 X-Z평면 $Y=0.003m$ 인 지점에서 X축과

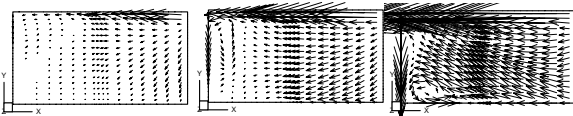
Z축을 기준으로 했을 때의 속도를 나타낸 것이다. X=0.1m와 Z=0.1m부근에서 속도가 급상승하는 것을 볼 수 있다.



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

Fig. 7 Distributions of velocity vectors at near wall of Y-Z plane, X=0.007m

Fig. 7은 Y-Z평면 X=0.007m의 수조벽면에서의 속도분포를 나타낸 것이다. X=0.2m의 반대편에서 유입된 유량이 X=0.007m 벽면에 부딪혀 벽면을 따라 유동되는 현상을 보였다.

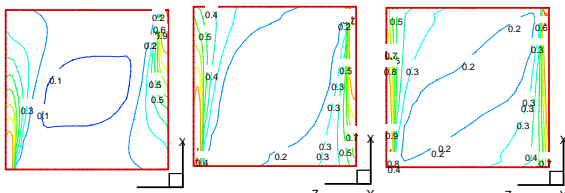


$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

Fig. 8 Distributions of velocity vectors at near wall of X-Y plane, Z=0.0025m

Fig. 8은 X-Y평면 Z=0.0025m의 수조벽면에서의 속도분포를 나타낸 것이다. 유량이 많을수록 하단부에 와류가 생기는 것을 확인할 수 있었다.

4.2 온도 분포

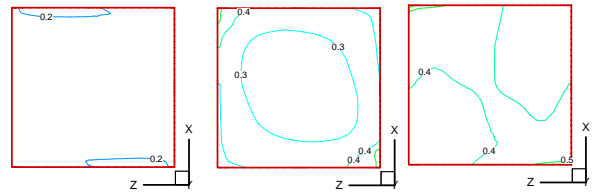


$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

Fig. 9 Distributions of temperature at near top of X-Z plane, Y=0.095m

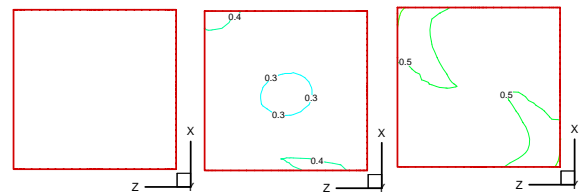
Fig. 9는 X-Z평면 Y=0.095m지점에서의 온도분포를 나타낸 것이다. 유량이 증가할수록 수조의 벽면의 높은 온도부가 길어지고, 중앙부로 갈수록 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 X-Z평면 Y=0.05m지점의 온도분포를 나타낸 것이며 유량이 많을수록 중앙부 온도가 상승하는 것을 알 수 있다.



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

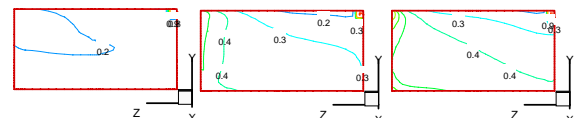
Fig. 10 Distributions of temperature at near center of X-Z plane, Y=0.05m



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

Fig. 11 Distributions of temperature at near bottom of X-Z plane, Y=0.003m

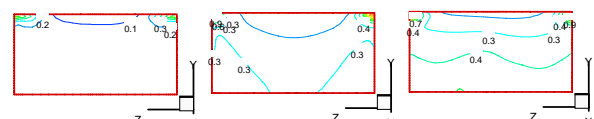
Fig. 11은 X-Z평면 Y=0.003m인 수조 바닥부의 온도 분포를 나타낸 것으로서 유량 0.5L/M에서는 온도분포가 가장 낮은 것을 알 수 있다.



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

Fig. 12 Distributions of temperature at near top of Y-Z plane, X=0.007m

Fig. 12는 Y-Z평면 X=0.007m지점의 온도분포를 나타낸 것이다. 유량 0.5L/M의 하단부를 보면 Fig. 11의 온도분포가 가장 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있다.



$Q=0.5L/M$ $Q=1.0L/M$ $Q=2.0L/M$

Fig. 13 Distributions of temperature at near center of Y-Z plane, X=0.1m

Fig. 13은 Y-Z평면 X=0.1m지점에서의 온도분포

를 나타낸 것으로 유량 1.0L/M에서 출구쪽으로 온도가 일정하게 분포하는 것을 볼 수 있다. 유량 2.0L/M에서는 하단부의 온도가 높지만 1.0L/M에 비해 유출이 잘 일어나지 않는 것으로 판단된다.

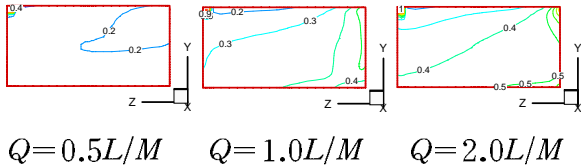


Fig. 14 Distributions of temperature at near bottom of Y-Z plane, X=0.193m

Fig. 14는 Y-Z평면 X=0.193m지점의 온도분포를 나타내며 Fig. 12와 반대의 분포를 나타낸다.

5. 결 론

최근에 고가 어종인 넙치 양식의 경우 저서 어종의 특징을 가지므로 인하여 수조 바닥면 근처의 열유동 분포 특성이 대단히 중요하다. 이와 관련하여 유입 유량의 변화에 따라 육상 수조식 양식장내의 속도와 온도분포를 수치 해석적으로 계산하여⁽¹²⁾ 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 유입 유량의 변화에 따른 수조식 양식장내의 속도, 온도분포를 정량적으로 파악하였다.
- (2) 수조 바닥면 근처에서의 유동분포는 유량이 많아지면 X축의 중앙부분에서 서로 반대방향의 유속이 존재함으로 인하여 양식장내의 부유물이 정체할 수 있는 환경이 발생할 수 있다.
- (3) 유량이 많을수록 수조 바닥 근처의 온도가 높아지며, 수심 방향의 온도도 상승하였다.
- (4) 본 연구에서는 유량 변화 특성만 고려하였으나 적절한 양식 온도환경이 중요하므로 양식장의 깊이의 변화에 대한 고려도 필요하다.

후 기

본 연구는 해양수산개발원 지원의 수산특정과정(No.09980004) 연구비와 경상대학교 BK21 지역대학육성사업단 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- (1) Jeong H. M., Chung H. S., 1998, "Study on fluid flow characteristics of aquarium for optimum environment", Air-Conditioning and Refrigeration Engineering., Vol.10, No.1, pp.108~117.
- (2) Bull. Nat' I. Fish. Res. Dev. Ins. Korea, 2000, "Annual Report of Korean Coastal Environment Monitoring 1999", Vol.4.
- (3) Bull. Nat' I. Fish. Res. Dev. Ins. Korea, 2001, "Annual Report National Fisheries Research and Development Institute 2000".
- (4) Kim S. H., Kim K. S., Yoo Y. C., 1992, "The Effect of Extruded Pellet Feed in Net Aquaculture on Water Quality of Lake", Bull. Nat' I. Fish. Res. Dev. Ins. Korea, Vol.46, pp.21~29.
- (5) Kim H. G., 1997, "Recent Harmful Algal Blooms and Mitigation Strategies in Korea", Ocean Research Vol. 19(2), pp.185~192.
- (6) Partridge, B. L., 1989, "The Structure and Function of Fish School" Sci. Am. Vol. 246, pp.90~99.
- (7) Sannomiya, N. and Matuda, K., 1987, "Least Squares Estimation in Fish Behavior Model", Bull. Japan. Soc. Sci. Fish., Vol.53, pp.1951~1957.
- (8) Launder, B. E. and Sharma, 1974, "Application of the Energy Dissipation Model of Turbulence to the Calculation of Flow Near a Spinning Disc" Letters in Heat and Transfer., Vol.1, pp.131-138.
- (9) Jones, W. P. and Launder, B. E., 1973, "The Calculation of Low-Reynolds-Number Phenomena with a Two-Equation Model of Turbulence", Int. J. Heat Mass Transfer., Vol.16, pp.1119-1130.
- (10) Patel, V. C., Rodi, W. and Scheuerer, G., 1985, "Turbulence Models for Near-Wall and Low Reynolds Number Flows" A Review, AIAA J., Vol.23, No.9, pp.1308-1319.
- (11) Launder, B. E. and Spalding, D. B., 1974, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering., pp.269-289.
- (12) Patankar, s. v., 1984, "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow", Hemisphere Publishing corporation.