

# 개체기반 어군행동모델을 이용한 가두리망 내의 양식 어류의 유영행동 시뮬레이션

황보규 · 신현옥\*

부경대학교 해양생산시스템관리학부

## Simulation of fish reaction against cage net with an individual fish behaviour model

Bo-Kyu HWANG and Hyeon-Ok SHIN\*

*Division of Marine Production System Management, Pukyong National University, Busan 608-737, korea*

Simulation technique for the fish behavior was applied to estimate fish school movement in the cage net. Individual-based fish behavior model (Huth and Wessel, 1991) was evaluated in a free area to understand the characteristics for the model, and the movement in the cage net was simulated by defining the fish reaction against the displacement of cage net. As a result, the distance to the net was not considerably changed and the space among fishes in cage net was slightly decreased by reducing the net space. Swimming area was, however, significantly affected by changing the net space and the relationship between swimming area and net displacement was theoretically estimated as  $y = -0.21x + 1.02$  ( $R^2 = 0.96$ ). these results leads the conclusion that individual-based model was appropriated to describe the fish school reaction in the cage net and be able to use for evaluating the influence on cultured fish.

Keywords: Fish behavior, Cage net, Individual-based fish behaviour model

### 서 론

양식어업은 2001년의 어업 육성법안의 시행에 따라, 지속적인 투자와 육성으로 양식어업의 생산량은 2000년대 이후 지속적으로 증가하였고, 2006년에는 처음으로 연근해 생산량을 넘어

섰으며 (KMI, 2007), 2007년에는 1조 6,000억 원으로 전체 수산업의 27.7%를 점고 있으며, 최근 연근해 어업자원 감소와 원양어장 축소 등으로 인하여 그 중요성이 더욱 높아지고 있다.

가두리 양식은 연안해역이나 육상에 사육망

\*Corresponding author: shinho@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5893, Fax: 82-51-629-5886

이나 수조를 설치하고 어류를 가두어 기르는 어업으로, 양식업을 위하여 해상에 설치한 가두리망은 조류나 파랑에 의해 영향을 많이 받게 되는데, 이러한 영향은 가두리망의 체적을 감소시킴으로서 어류의 운동에 제약을 줄 뿐만 아니라, 심할 경우에는 어체에 손상을 주어 어류들을 폐사시키는 원인이 되기도 한다 (Kim et al., 2001).

가두리 양식에 관한 연구는 주로 조류에 의한 시설물의 안정성의 관점에서 많은 연구들 (Kim et al., 2000; Kim et al., 2001; Kim et al., 2007; Lee and Lee, 2004)이 수행되어 왔으며, 이러한 가두리망의 거동에 따른 양식어류의 유영행동의 제약이나 행동패턴의 변화 등에 대한 영향을 파악하고자 하는 연구는 찾아보기 힘들다.

어류는 군집행동을 하는 대표적인 생물로서, 어류군집행동 또는 외부자극에 대한 어류 행동반응은 어류행동을 모델화한 시뮬레이션 기법 (Lee et al., 1995; Chang et al., 1998; Lee et al., 2008)과 초음파 텔레메트리 시스템을 이용한 어류행동의 측정법 (Shin and Lee, 1999; Chang et al., 2001) 이 활용되었다. 최근에는 어구에 대한 어류의 행동반응 시뮬레이션을 통하여 어획과정을 이해하고자 하는 연구 (Takagi et al., 2004; Lee et al., 2008) 등이 수행되는 등 어구에 대한 어군행동반응을 이해하는데에 적용되고 있다.

이에 본 연구에서는 가두리 양식장에서 사육되는 양식 어류의 유영행동특성 검토하고자, 어류행동에 대한 이론 시뮬레이션 모델을 활용하여, 가두리망에 적용하고, 망의 거동에 따른 어류행동 분석에 대한 적용 가능성을 검토하였다.

## 재료 및 방법

### 개체기반 어군행동모델

Aoki (1982)는 몰개류와 참돔의 어군행동을 분석하고 어류의 어군행동을 개체어의 생물학적 특성으로부터 모델화한 개체기반 어군행동 모델 제안하였는데, 이 모델은 외부자극이 없는 상태에서 스스로 군집하여 독립적으로 유영

하는 모델로서, 특정의 leader가 존재하지 않는 어군행동을 잘 묘사하고 있다. Huth and Wessel (1991)은 Aoki (1982)의 개체기반모델을 바탕으로, 이웃개체에 의한 유영방향 결정법을 검토하여 보다 자연스러운 개체 간의 평행유영패턴을 구현하였는데, 본 연구에서는 Huth and Wessel (1991)의 모델을 이용하였다.

이 모델은 다음과 같은 4가지의 초기 가정을 가진다. 첫째, 시간간격은 일정하고, 어류의 행동은 시간간격인  $\Delta T$ 로 결정되며, 행동의 결정은 전 단계와 독립적이다. 둘째, 가상의 어류들은 수평의 2차원 평면을 유영한다. 셋째, 유영행동의 2가지 구성요소인 유영속도와 유영방향은 특정한 확률분포에 따라 결정되며, 속도와 방향은 독립적이다. 마지막 네째는 초기단계에서 개체는 특정영역 내에 random하게 분포하며, 방향 역시  $0^\circ - 360^\circ$  범위에서 균일분포한다라고 가정하였다. 이 때 어류는 이웃한 개체들과의 상호영향을 받아 다음 단계의 유영행동을 결정하며, 이 개체행동의 결과가 연속적인 어군유영형태로 나타나게 된다. 이 모델에서는 개체어가 유영속도와 유영방향을 결정할 때 나타나는 생물의 비규칙성을 모델화하고 있는데, 어류의 유영속도의 특성은 식 (1)과 같은 gamma분포를 따르는 random값으로 구현된다.

$$f(v) = \frac{A^K}{\gamma(K)} e^{-Av} v^{K-1} \quad (1)$$

여기서,  $v$ 는 어류의 유영속도,  $K$ 와  $A$ 는 감마분포의 파라미터이다. 그리고, 유영방향의 결정은 어류가 인지할 수 있는 영역 내에 존재하는 이웃개체의 영향으로 결정되는데, 그 영역은 어류의 시각과 측선 등에 의한 주변의 인지영역 (Fig. 1)의 정의로부터, 접근, 회피, 평행유영 등으로 나누어진다. 이러한 주변개체의 영향은 인지하는 개체와 주변개체 사이의 상대적인 위치에 따른 순위를 고려하여 최대 4개체까지 인식하게 된다. 개체어의 유영방향은 이러한 영향을 합성한

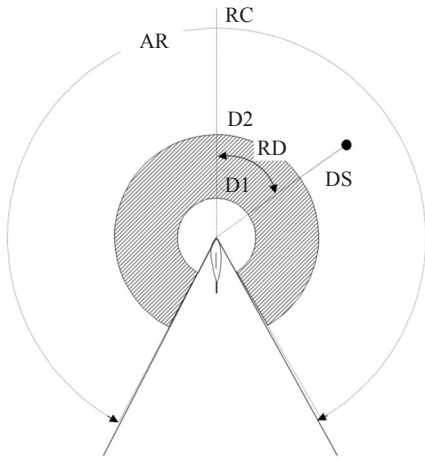


Fig. 1. Geometrical drawing to illustrate parameters specifying interaction (D1: Avoidance distance, D2: Approach distance, RC: Radius of extent of near-field interactions, AR: Angular range of interactions), (redrawn from Aoki (1982)).

평균과 표준편차  $15^\circ$ 의 정규분포를 따르는 random값으로 표현되는데, 유영방향에 대한 정규분포는 식(2)와 같다.

$$p_i(\theta) = \sum_j \frac{1}{S_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\theta - \bar{M}_j)^2}{2S_j^2}} \quad (2)$$

여기서,  $\bar{M}_j$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\bar{M}_j = \sum_{i=1}^{nb} M_{ij} / nb \quad (3)$$

가두리망 내의 어군행동반응을 구현하기 위해서는 가두리 벽면에 대한 개체의 반응행동을 정의해야한다. Shinchi et al. (2002)은 어군행동 모델 연구에서 수조벽면에 대한 어군반응행동을 정의하고, 정어리 치어의 유영행동을 촬영하여 비교검증하였다. 수조벽면에 대한 반응행동은 Fig.2에 나타낸 바와 같이, 행동반응을 나타내는 인지거리를 정의하고, 물고기의 유영방향과 수조 벽면과 이루는 각도와에 관계로부터 다음과 같이 정의하였다.

$$\beta_i = \min \{ \Delta(\alpha_i(t), \theta_1), \Delta(\alpha_i(t), \theta_2) \} \quad (4)$$

그리고, 수조의 Corner에 대한 반응행동은

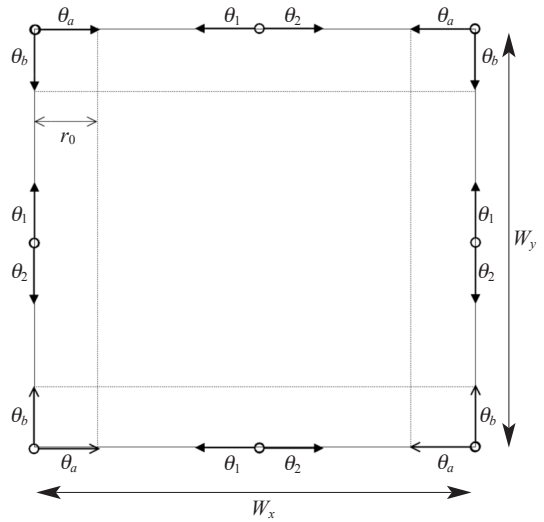


Fig. 2. Boundary condition of fish behavior model by cage net (redrawn from Shinchi et al., 2002).

$$\beta_i = \min \{ \Delta(\alpha_i(t), \theta_a), \Delta(\alpha_i(t), \theta_b) \} \quad (5)$$

로 정의된다.

본 연구에서는 수조벽면에 대한 반응행동을 어망에 대한 행동에 적용하였는데, 이 때, 망에 대한 인지거리인  $r_0$ 는 어군행동모델에서 다른 개체를 인지하는 최대거리인 5BL로 하였다. 그리고, 가두리망은 연안에서 가장 흔하게 볼 수 있는 사각형 망 (L:6m × W:6m × H:6m)로 하였고, 어류의 체장은 약 30cm로 가정하였다. 또한, 개체가 망을 인지하여 영향을 받아 유영방향을 결정할 때에는 이웃 개체에 의한 영향과 동일하게 처리하였는데, 식(4)와 (5)의해 계산된 망에 의한 영향을 식(3)에 포함시켜 계산하였으며, 최종적인 유영방향을 계산하는 식(2)에서는 표준편차값을 0으로 하였다.

행동 시뮬레이션에서는 시뮬레이션시 계산속도 등을 고려하여 총 8개체로 정하였으며, 각 조건에 대하여 반복적으로 시뮬레이션 한 후, 각 조건을 대표할 수 있는 결과를 이용하여, 어망에 따른 어군유영행동패턴을 분석하였다. 시뮬레이션에 사용한 파라미터 값을 Table 1에 나타내었다.

**Table 1. Parameters and values for simulation of fish school movement**

Parameters	Values*
Number of individuals	8
Final Step length	1000
Time interval of step	0.5sec
Range of initial locations	4.6BL
Parameters of gamma distribution K	4
A	3.3
Standard deviation of normal distribution	
Approach and avoidance	15°
Parallel orientation	15°
Avoidance distance	0.5BL
Approach distance	2.0BL
Radius of extent of near-field interactions	5BL
Angular range of interactions	150°
Detection distance to cage net	5BL
Total length of fish	30cm
Size of cage (square type net)	6m×6m×6m (L×W×H)

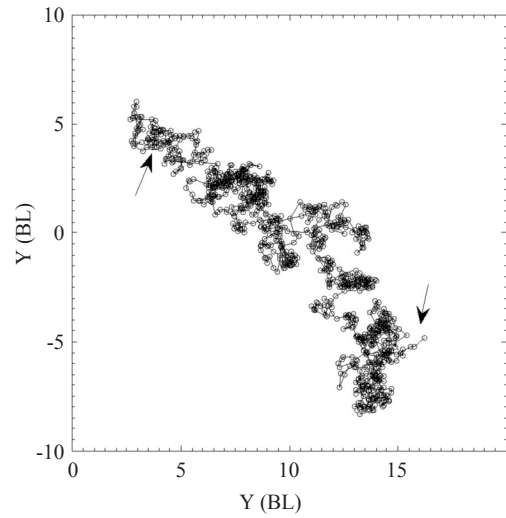
\* based on Aoki (1982)

### 결과 및 고찰

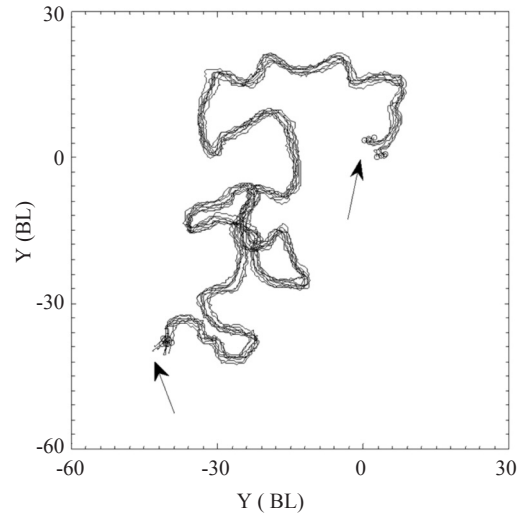
#### 자유공간에서의 개체어의 유영행동

Fig. 3은 개체어를 이용하여 1000 time step에 대하여 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 단일어는 유영방향에 영향을 주는 이웃개체가 없기 때문에 균일분포를 따르는 랜덤변수만으로 유영방향이 결정되므로, 주변의 개체를 찾아 지속적으로 유영방향을 바꾸어가며 유영하는 어류의 유영행동을 나타내었다.

8마리의 가상의 개체에 대한 유영행동 시뮬레이션 결과는 Fig. 4와 같다. 단일어의 유영시뮬레이션 결과(Fig. 3)와는 달리, 초기영역 ( $x < 4.6, y < 4.6$ )에 분포하였던 어군은 초기 단계에서 서로의 위치관계로부터 유영방향을 결정하면서, 이후 상호작용에 의해 결정된 방향으로 서로 간격을 두고 어군형태로 유영하였다. 1000 time step의 시뮬레이션 단계 동안 서로 유사한 유영방향을 가지고 유영하는 어군유영패턴이 나타났는데, 이것은 개체 상호간의 상대위치에 따른 근접, 회피, 평행유영의 3가지 행동패턴의 합성으로 인한 것으로 단일어의 경우 보다 먼 범위를 유영하는 특성을 보였다.



**Fig. 3. The movement of virtual single fish behavior simulated during 1000 time steps in free space.**



**Fig. 4. The Swimming behavior of virtual fish school (N=8) simulated during 1000 time steps.**

Fig. 4의 시뮬레이션 과정에서 나타난 어군유영형태의 특성은 Fig. 5와 같다. 초기 개체어는 제한된 구역 내에서 랜덤하게 결정된 위치와 유영방향을 하고 있으나 (Fig. 5의 (a)), time step이 증가하면서, 어군을 이루어 유영하는 특성을 보였는데, 초기위치부터 200 time step이 진행하였을 때는 이미 전체 어류가 특정한 유영방향으로

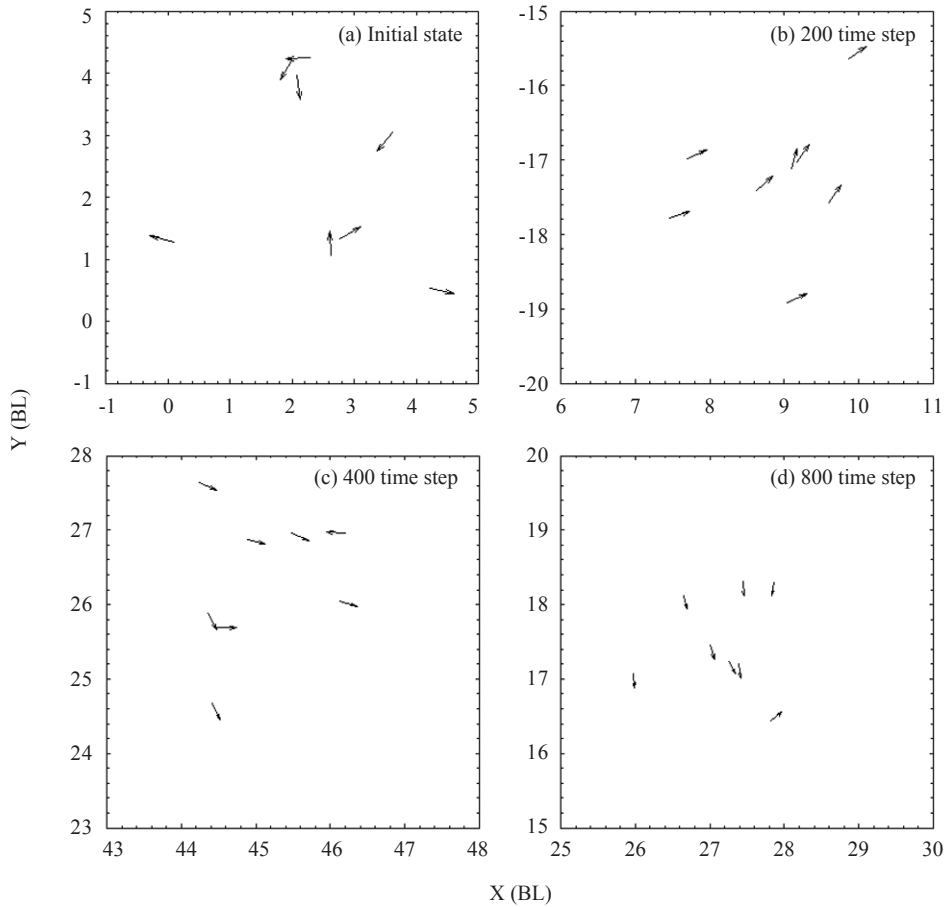


Fig. 5. Schooling formations of virtual 8 fishes in the test simulation (Fig. 4). The arrow direction indicates the heading of fish.

유영을 하고 있는 것을 알 수 있다. 400 time step 과 800 time step에서 나타난 바와 같이 일부 개체는 유영방향은 어군의 전체적인 유영방향과는 크게 차이를 보이는 개체도 나타나지만, 다음 step에서 이웃개체의 방향을 인지하여 이후 어군의 유영방향을 따라 진행하였으며, 어느 정도의 거리를 유지하며 지속적으로 유영하였다. 또한, 개체수를 30마리로 증가시켜 실시한 시뮬레이션의 경우에도 개체수가 작았던 경우와 동일하게 각 개체 모두 지속적인 어군유영행동이 나타났다 (Fig.6). 개체수와 관계없이 자연스러운 유영행동패턴이 나타났으므로, 개체수를 증가에 따른 어군행동 양상의 큰 변화는 없는 것으로

판단된다.

식 (1)로 구현한 각 개체의 유영속도 빈도분포를 Fig. 7에 나타내었다. 각 개체에 대한 유영속도값의 빈도분포를 확인한 결과,  $\gamma$  분포를 따르고 있는 것으로 보아, 개체어의 유영속도 값이 적절하게 주어진 것으로 판단된다.

#### 패쇄공간(가두리망 내)에서의 시뮬레이션

폐쇄공간인 가두리 망 내의 어군행동을 시뮬레이션한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 8의 실선은 8개체의 수평위치를 평균한 것으로 어군 중심의 이동을 의미하며, 점선은 망의 형상을 나타낸다. 가두리망의 크기는 어체장을 30cm로 가

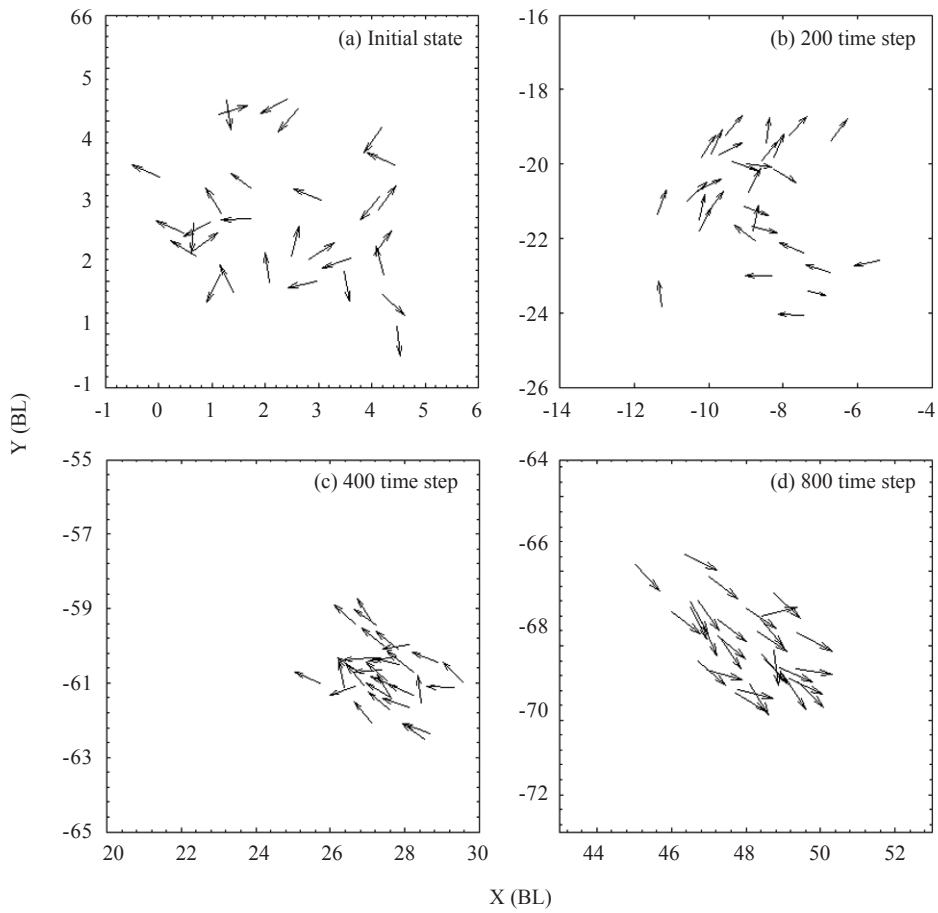


Fig. 6. Schooling formations of virtual 30 fishes in the test simulation.

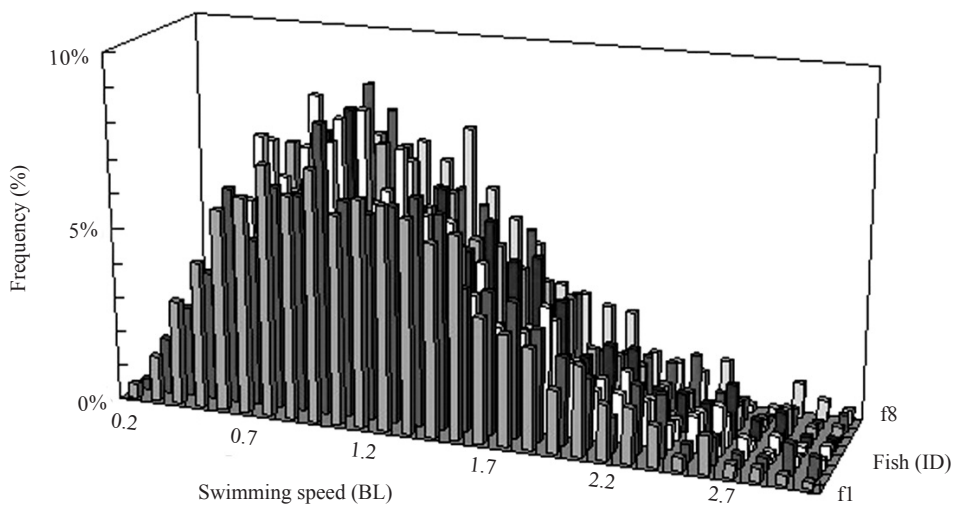


Fig. 7. Distribution of swimming speed for each fish in test simulation.



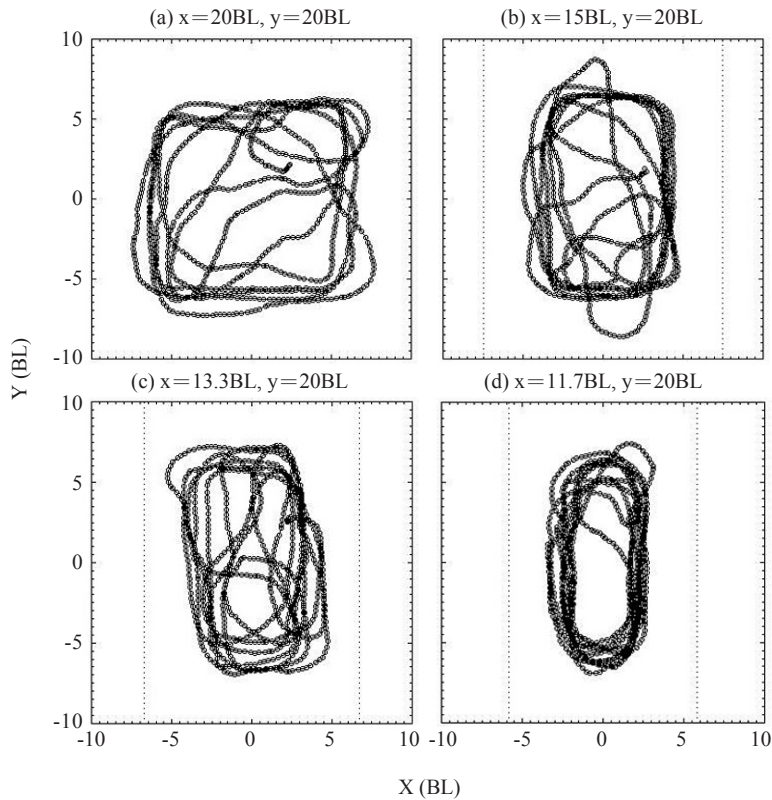


Fig. 8. The averaged trace of fish school movement ( $n=8$ ). Dotted lines indicate wall of net.

정하였기 때문에, 망의 가로와 폭이 각 6m인 가두리망을 나타내며, (a)는 조류의 영향이 없는 상태, (b)는 망의 가로 (x축 방향)가 조류에 의해서 1.5m 줄어들었을 때, (c)와 (d)는 각각 2m, 2.5m가 줄어들었을 때를 의미한다. 어군의 행동은 모든 조건에서 망과 일정한 간격을 유지하며 유영하려는 특성으로 인하여, 대부분의 step에서 망 전체의 면적을 이용하여 유영하였으며, 경우에 따라 유영궤적의 중심을 가로질러 회전 방향을 바꾸어 반대방향으로 유영하기도 하였다. 그러나, x축 방향으로 망의 면적이 줄어들었을 때에는 어군이 망과의 거리를 일정하게 유지하려는 성질 때문에 망의 거동과 함께 유영면적이 줄어들었으며, y축 방향으로 좁은 공간에서 유영방향을 급하게 전향하는 형상을 나타내었다.

Table 2. Averaged distances from the center of school for the net space ( $N=8$ )

Length of net (X)		$\Delta D$	S.D.
BL	m		
20BL	6m	0.839	0.143
16.7BL	5m	0.833	0.118
15BL	4.5m	0.825	0.123
13.3BL	4.0m	0.821	0.153
11.7BL	3.5m	0.798	0.124

어군행동시 어군 중심과 각 개체어 사이의 평균거리 ( $\Delta D$ )를 Table 2에 나타내었다. 이 값은 유영시의 집중도를 나타내는데, 망 면적의 축소에 따라 큰 변화는 없었으나, 망의 면적이 감소할수록 다소 감소하는 특성을 나타내었다. 이 경향으로 미루어보아 망 면적의 축소는 개체어의 유영간격의 변화에도 영향을 주는 것으로 판단된다.

어망의 거동에 따른 공간이용도의 변화를 Fig.

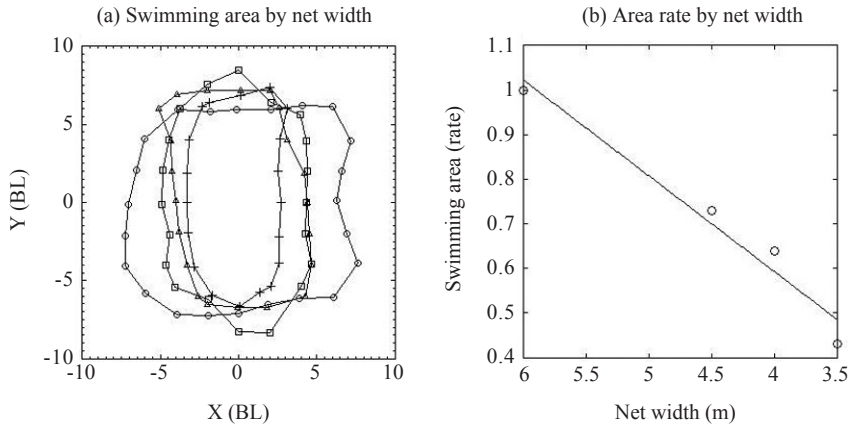


Fig. 9. Swimming area change by net movement (○ : normal situation, □ : 4.5m △ : 4m, + : 3.5m in net width).

9에 나타내었다. 공간 이동도는 Fig. 8의 (a)의 어군 중심의 이동궤적에서 가장 외곽으로 이동한 경우에 대한 위치를 약 2m 간격으로 구하고, 이 위치를 기준으로 배횡거법 (double meridian distance method)을 이용하여 면적을 구하였으며, 비율은 망의 거동이 없는 경우(Fig. 8의 (a))에 대한 비로 구하였다. 유영면적은 어구가 조류에 의하여 면적이 축소됨에 따라 빠르게 감소하였으며, 그 관계는  $y = -0.21x + 1.02$  ( $R^2 = 0.96$ )으로 나타났다.

가두리 망 내를 유영하는 양식어류의 서식환경은 양식어류의 질적문제와 직결될 것이다. 본 연구에서는 기존의 어군행동 시뮬레이션 기법을 검토하여, 연안에서 가장 많이 볼 수 있는 사각 소형 가두리망에 대한 어군행동을 구현하고자 하였다. 어군행동의 시뮬레이션에서 어류가 망을 인지하는 거리는 어종에 따라 다를 것으로 생각되며, 어군행동패턴도 어종에 따라 크게 차이가 날 것이다. 실제로, 가두리 어장에서 어류의 어군행동을 관찰해 보면 어종에 따라 망에 가깝게 접근하거나, 어군행동보다는 개체 행동을 많이 나타내는 어종도 존재한다. 본 검토에서는 강한 어군유영형태를 나타내면서, 빠르게 유영하는 고등어와 같은 어종의 유영행동을 구현하기 위해, Huth and Wessel (1991)의 Averaging

model을 선택하였고, 망에 대한 인지거리도 5BL로 길게 설정하였다. 특정 어종에 대한 어군행동을 시뮬레이션 하기 위해서는 어종에 맞는 시뮬레이션 파라미터를 구하여, 실제 유영행동과 비교 검토할 필요가 있을 것으로 판단된다.

한편, 망의 거동에 따른 시뮬레이션에서, 망의 폭이 크게 줄어들었을 경우, 망 내에 가두어지지 못하고 망을 뚫고 지나가는 현상이 많이 나타났는데, 이것은 시뮬레이션 상의 계산오차일 수도 있으나, 망에 의한 어군행동반응을 강하게 설정하지 않았기 때문으로 생각되며, 이러한 현상에 대해서는 망에 가깝게 접근하였을 때의 반발행동을 정의할 필요가 있을 것으로 판단된다.

이 후, 스테레오 촬영기법 등을 적용하여, 어류의 유영행동을 구명함과 동시에, 3차원 음향 텔레메트리 기법 등을 이용하여 어류의 3차원 거동을 연속적으로 관측하여 비교함으로써, 정확도 높은 어군행동 시뮬레이션이 가능할 것으로 판단된다.

### 결 론

본 연구는 개체기반모형을 이용하여, 가두리 망 내의 어군의 유영행동을 시뮬레이션 모델로 구현하고, 망의 거동에 따른 어군행동 반응을 분석하였다. 개체기반모형은 Huth and Wessel



(1991)이 제안한 개체기반모델을 사용하였고, 가두리 망에 대한 행동반응을 정의하여 시뮬레이션 하였다. 자유공간에 대한 어군행동 시뮬레이션에서 어군의 자연스러운 유영행동이 표현되므로써, 시뮬레이션기법이 타당함을 확인하였다. 가두리 망의 거동에 따른 어군행동 시뮬레이션 결과, 어군행동은 망의 폭이 감소함에 따라 유영면적이 감소하였는데, 유영면적비와 망폭 사이의 관계는  $y = -0.21x + 1.02$  ( $R^2 = 0.96$ )로 나타났다. 이후 현장 실측기법을 이용하여 그 결과와 비교검토하므로써, 조류에 따른 가두리망의 거동과 그에 따른 사육어의 유영행동반응을 보다 정량적으로 분석할 수 있을 것을 판단된다.

## 사 사

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2009-351-KRF-F00018).

## 참고문헌

- Aoki, I., 1982. A simulation study on the schooling mechanism in fish. *Bull. Japan. Soc. Sci. Fish.*, 48 (8), 1081 – 1088.
- Chang, H.Y., D.S. Kim, Y.S. Kim and S.S. Lee, 1998. Studies on the developement of three dimensional positioning system and numerical modeling of fish behavior. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 34 (4), 393 – 402.
- Huth, A. and C. Wissel, 1992. The simulation of the movement of fish schools. *J. Biol.*, 156, 365 – 385.
- Kim, S.K., K.U. Yang, D.A. Kim and T.H. Kim, 2007. Deformation and flow resistance characteristics of model net cages according to shapes and arrangements of sinkers. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 43 (3), 192 – 205.
- Kim, T.H., D.A. Kim, C.R. Ryu, J.O. Kim and E.C. Jeong, 2000. Flow Resistance of Model Cage Net. *Journal of Korean Fish. Society*, 33 (6), 514 – 519.
- Kim, T.H., J.O. Kim and C.R. Ryu, 2001. Dynamic Motions of Model Fish Cage Systems under the Conditions of Waves and Current. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 34 (1), 43 – 50.
- Kim, T.H., J.O. Kim and D.A. Ahn, 2001. Deformation of cage nets against flow velocity and optimal design weight of sinker. *J. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 37 (1), 45 – 51.
- KMI, 2007. Study on condition snalysis and pobject of policy for fishery industry and among Korea, China and Japan. KMI 2007 – 19, pp. 262.
- Lee, B.G., D.J. Lee and H.Y. Chang, 1995. A study on the numerical modeling of the fish behavior to the model net. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 31 (4), 307 – 322.
- Lee, G.H., C.W. Lee, Y.B. Kim, P. He and M.Y. Choe, 2008. Simulation of the virtual mackerel behavior to the trawl gear. *Bull. Korean Soc. Fish. Tech.*, 44 (1), 10 – 19.
- Lee, M.K. and C.W. Lee, 2004. Dynamic analysis of a cage affected by the current. *Bull. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 40 (3), 214 – 224.
- Oboshi, T., S. Kato, A. Mutoh and H. Itoh, 2002. Collective or scattering behaviors to escape from predator. in *Artificial life VIII*, Standish, Abbass, Bedau (eds), MIT Press, 386 – 389.
- Shin, H.O. and J.H. Lee, 1999. Behavior of amber fish, *Seriola aureovittata* released in the setnet. *Bull. Kor. Soc. Fish. Tech.*, 35 (2), 161 – 169
- Shinchi, T., T. Kitazoe, H. Nishimura, M. Tabuse, N. Azuma and I. Aoki, 2002. Fractal evaluation of fish school movements in simulations and real observations. *Atif. Life Robotics*, 6, 36 – 43.
- Takaki, T., M. Ytaka, J. Iwata, H. Nakamine and N. Sanmomiya, 2004. Mathemetical model of fish schooling behavior in a set net. *ICES J. Mar. Sci.*, 61, 1214 – 1223.

2011년 11월 4일 접수

2011년 11월 17일 1차 수정

2011년 11월 21일 수리