

模型 그물에 대한 魚群行動의 數值 모델링에 관한 研究*

- 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 파라미터 推定 -

李秉鎬 · 李昊在 · 張鎬榮**
釜山水產大學校, 群山大學校**
(1995년 9월 30일 접수)

A Study on the Numerical Modeling of the Fish Behavior to the Model Net* - Parameter Estimation in Numerical Model of Fish Behavior -

Byoung - Gee LEE, Dae - Jae LEE and Ho - Young CHANG**
National Fisheries University of Pusan*, Kunsan National University**
(Received September 30, 1995)

Abstract

In order to gain a fundamental data for forecast or control of fish behavior and evaluated the feasibility of an application of the modeling technique to a field, in this paper, a numerical model for describing the behavior of fishes in a water tank was presented. The parameters of the model were estimated by using the time - series data on the three - dimensional position of fishes and by applying the least squares algorithm. The estimated parameters were standardized to examine the variation of parameters according to the number of individuals and flow speed that the mean values of parameters were to be zero and their variances were to be one.

The results obtained can be summarized as follows :

- (1) The standardized parameter a^* of propulsive force decreased according to increased the number of individuals and the flow speed.
- (2) The standardized parameter k_b^* of interactive force increased according to increased the number of individuals, but decreased according to the flow speed.
- (3) The standardized parameter k_c^* of schooling force increased according to increased the number of individuals and the flow speed.
- (4) The standardized parameter $|k_{ic}^{+*}|$ of repulsive force against wall or bottom increased according to increased the number of individuals, but decreased according to the flow speed.
- (5) The standardized parameter $|k_{ic}^{-*}|$ of attractive force against wall or bottom was generally constant according to increased the number of individuals, but increased according to the flow speed.
- (6) The standardized parameter v^* of damping force increased according to increased the number of individuals, but decreased according to the flow speed.

* 이 論文은 1993年度 韓國科學財團의 核心專門研究課題 研究費 支援에 의한 研究結果의 일부임.

序 言

漁具에 대한 魚群의 行動은 예전부터 研究의 對象이 되어 왔다. 漁具의 漁獲機構는 기본적으로 魚群의 行動을 이용하는 것이기 때문에, 漁具의 設計 · 設置方法 등에 의한 漁獲性能의 향상 및 水產資源의 보호 등을 위해서도 漁具에 대한 魚群行動의 研究는 대단히 중요한 課題이다. 또한, 새로운 漁業形態로서 海洋牧場의 實用化가 요구되고 있으며, 이러한 海洋牧場이나 蓄養場에서는 自然의 灣 등을 이용해 海域을 차단하여 魚群이 자유롭게 遊泳하는 상태에서 飼育하므로, 魚群의 散逸防止나 誘導를 위하여 魚群의 行動을 制御하는 기술이 필요하다(三宮; 1993).

魚群行動의 모델化에 관한 研究로서 Breder (1954; 1959)는 群을 이루는 個體 사이에 작용하는 힘을 도입하여 魚群行動의 메카니즘에 관한 研究를 시작하였으며, 1970년대부터 본격적으로 고기의 行動을 모델化하여 魚群行動을 추정하려는 시도가 계속되었다. 컴퓨터 기술이 급속히 발달함에 따라 컴퓨터에 의한 시뮬레이션도 가능하게 되어 Norway, 日本 등에서 魚群行動의 모델을 構築해 왔다.

Norway의 Balchen(1972; 1975; 1976; 1981)은 刺戟에 대한 魚群行動에 스칼라 函數를 定義한 魚群行動의 모델을 提案하였으나, 이 모델은 아직까지 실제 데이터로서 파라미터를 推定하여 報告한 바가 없다. 한편, 日本에서는 Sakamoto *et al.* (1975)의 研究를 시작으로 Inagaki *et al.* (1976), Aoki(1982; 1986)는 魚群行動의 시뮬레이션 모델을 작성하여 고기가 群을 이루어 遊泳하는 構造에 대하여 분석하였다. 三浦(1978; 1979a; 1979b; 1981), 三浦 등(1983; 1986; 1989)은 定置網의 漁具空間을 想定하여 水槽를 몇 개의 特性을 가진 領域으로 나누고, 각각의 領域에 대하여 고기에 작용하는 固有의 特性을 결정하여 고기의 遊泳行動에 대한 確率 모델을 構成하였다. 한편, Matuda and Sannomiya(1980), Sannomiya and Matuda(1984; 1987), 三宮 등(1986; 1990), Matuda *et al.*(1993)의 研究에서는 魚群을 구성하고 있는 각 個體를 하나의 質點으로 간주하여 그

行動을 Newton의 運動方程式으로 記述한 魚群行動을 나타내는 物理 모델을 提案하고, 水槽實驗에 의해 구해진 畫像情報를 이용하여 모델의 파라미터를 推定하고 檢定한 바 있으며, 梁 등(1992; 1994), 高木 등(1993) 등의 研究가 계속되고 있다.

魚群行動의 모델化에 관하여서는 많은 研究가 행해지고 있으나 傳統의 研究方法와 비교하면 아직 初步段階에 지나지 않으며, 지금까지 진행된 魚群行動의 모델링에 관한 研究도 魚群의 行動空間을 靜水狀態에서의 2차원 공간으로 한정된 모델이기 때문에, 실제 漁場에서와 같은 3차원 공간에서의 魚群行動을 추정하는 데는 문제가 있다. 모델링에 관한 研究結果가 확립되어져서 장차 실제 漁業에서 이용하기 위해서는 먼저 流速이 있는 3차원 공간을 對象으로 하여 魚群行動을 나타낼 수 있는 모델링이 이루어져야 할 것이다.

따라서, 이 研究에서는 魚群行動의 推定 및 制御 등을 위한 基礎資料의 제공과 魚群行動의 모델링 技法을 現場에 적용하기 위한 可能性을 모색하기 위하여 魚群行動을 나타내는 數值 모델을 작성하고, 流速이 있는 實驗水槽에서 遊泳하는 무지개송어의 個體 및 魚群의 3차원 위치 時系列 데이터를 이용하여 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 파라미터를 最小自乘法로 推定한 結果를 報告한다.

水槽實驗 데이터의 取得

魚群行動을 나타내는 모델의 파라미터를 同定하기 위해서는 시스템의 入出力 데이터가 필요하다. 水槽實驗에 의한 각 個體의 3차원 위치 時系列 데이터의 取得은 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우로 구분하였으며, 模型 그물이 없는 水槽에서의 魚群行動에 대한 데이터의 取得은 李 등(1995)에서 記述한 바와 같다.

한편, 模型 그물이 있는 水槽에서의 魚群行動에 대한 3차원 위치 時系列 데이터를 取得하기 위하여 觀測空間內에 설치한 模型 그물의 構造는 우리나라 沿岸에서 사용하고 있는 대표적인 落網(李 등; 1989)을 약 1/200의 크기로 축소하여 單純化시킨 것으로서, 模型 그물이 물의 흐름에 견딜 수 있도록 직경 5mm의 스테인레스 봉을 사용하여 그

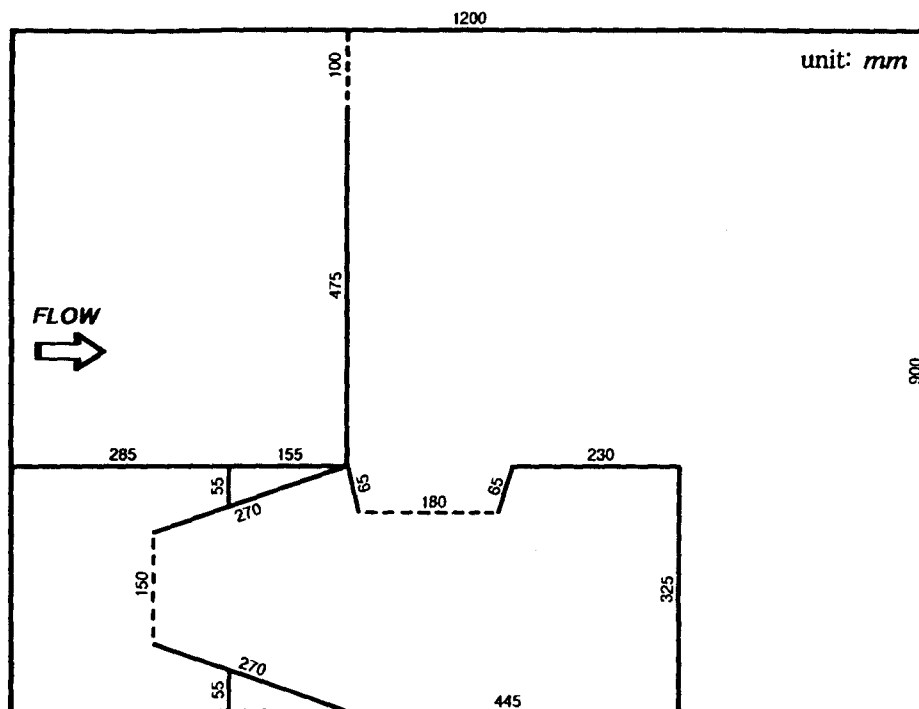


Fig. 1. Schematic diagram of the model net used in experiment.

Table 1. Details of fish size used in the experiment with model net

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	Body weight (g)	Body length (cm)	Body height (cm)	Body width (cm)
0	1	8.5	8.3	1.92	0.97
	2	7.8	7.9	1.92	0.98
	3	8.5	8.2	1.87	1.01
	5	8.0	8.0	1.85	1.04
	7	7.1	7.9	1.76	0.99
	10	7.7	7.9	1.77	0.99
5	10	7.0	7.8	1.71	0.93
10	10	8.4	8.3	1.79	1.00
15	10	8.7	8.4	1.79	1.03
20	10	5.8	7.5	1.52	0.87
25	10	8.8	8.4	1.82	1.00

물감을 고정할 틀(frame)을 Fig. 1과 같은 크기로 만들어 Nylon 210D 9합사 13절의 그물감에 약 70%의 成形率을 주어 틀에 붙였으며, 模型 그물의 높이는 水深과 같이 50cm로 하였다.

또한, 模型 그물이 있는 水槽에서의 實驗에 사용된 魚體의 크기는 Table 1과 같으며, 李 등(1995)에서와 같이 水槽內에서의 遊泳行動을 촬영한 映

像資料를 晝像處理하여 계측한 각 個體의 위치 時系列 데이터를 이용하여 流速의 변화에 따른 魚群의 平均 遊泳速度, 平均 遊泳 깊이, 水槽 벽과 個體 사이의 平均 距離 및 個體相互間의 平均 最近接距離 등의 遊泳特性을 조사한 結果는 Table 2와 같다.

Table 2. Results of experiment in the water tank with model net

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	Swimming speed (cm/sec)	Swimming depth (cm)	Distance of individuals from wall of tank (cm)	Nearest distance between individuals (cm)
0	1	11.8(1.4BL)	-40.0	15.0	-
	2	15.9(2.0BL)	-35.6	15.6	17.8
	3	18.3(2.2BL)	-27.9	13.4	11.2
	5	15.3(1.9BL)	-36.3	14.5	6.5
	7	16.9(2.1BL)	-28.1	15.5	6.5
5	10	16.9(2.1BL)	-22.0	13.0	5.6
	10	15.9(2.0BL)	-23.6	8.0	4.8
10	10	16.8(2.0BL)	-39.4	12.0	2.7
15	10	19.3(2.3BL)	-33.5	10.8	6.2
20	10	23.1(3.1BL)	-33.9	14.7	5.8
25	10	26.1(3.1BL)	-33.3	15.3	5.8

魚群行動을 나타내는 數值 모델의 構成

靜水狀態 및 流速이 있는 水槽에서의 魚群行動을 나타내는 3차원 모델은 魚群行動을 나타내는 2차원 모델인 Sannomiya and Matuda(1987)의 모델을 기초로 하여 다음과 같이 3차원 모델로 수정·보완하여 構成하였다.

魚群의 行動을 하나의 시스템으로 간주하면, 다음과 같이 線形化한 모델式으로 나타낼 수 있다.

$$F(a, b, \dots) = f_1(a) + f_2(b) + \dots \quad (1)$$

여기서, $F(a, b, \dots)$ 는 魚群의 行動을 나타내며 $f_1(a), f_2(b), \dots$ 는 魚群의 行動을 결정하는 要素를 나타내는데, 이 모델의 式 $F(a, b, \dots)$ 는 個體의 質量 × 個體의 加速度이고, $f_1(a), f_2(b), \dots$ 는 각각 고기가 群을 이루어 行動하기 때문에 생기는 힘으로서, 三宮 등(1986)은 運動의 要因을 다음과 같이 4가지로 大別하였다.

- (1) 個體의 고유한 힘
- (2) 個體가 群 속에서 다른 個體로부터 받는 힘
- (3) 個體가 環境으로부터 받는 힘
- (4) 기타에 의한 힘

여기서, (1)은 個體가 단독으로 遊泳하기 위한 前方推進力과 個體의 運動으로 인해 물로부터 받는 抵抗力, (2)는 個體 사이의 誘引力과 成群力, (3)은 水槽 벽으로부터의 反撥力, 誘引力 및 方向場의

힘, (4)는 外亂에 의한 힘으로 생각할 수 있다.

靜水狀態 및 流速이 있는 水槽에서의 시스템의 狀態變數인 個體 i 의 위치 벡터와 속도 벡터는 Fig. 2와 같이 각각

$$\begin{cases} x_i = (x_{ix}, x_{iy}, x_{iz})^T \\ \dot{x}_i = ((U - \dot{x}_{ix}), \dot{x}_{iy}, \dot{x}_{iz})^T \end{cases} \quad (2)$$

로 나타낼 수 있다. 여기서, 添字 x, y, z 는 3차원 공간에서의 벡터의 各成分을, T 는 벡터의 轉置記號를, \cdot 는 시간 t 에 대한 微分을, U 는 x 軸 방향으로만 작용하는 流速을 나타낸다.

各 個體의 運動要因(推進力)을 個體에 작용하는 外力으로서 나타낼 수 있고, 外力에 포함되어 있는 파라메터는 群을 구성하는 모든 個體가 均質한 것으로 假定하면, 고기의 群行動은 다음과 같은 狀態方程式으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} m\ddot{x}_i(t) &= F_i(t, x_1, x_2, x_3, \dots, x_{Nf}, x_{Nf}) + \xi(t) \\ i &= 1, 2, \dots, Nf \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, i 는 個體를 구성하는 各 個體를, m 은 個體의 平均質量을, F_i 는 個體 i 에 가해진 外力을, N_f 는 魚群을 구성하고 있는 個體數를, $\xi(t)$ 는 外亂을 나타낸다.

式 (3)에서 外力 F_i 는 前述한 7가지의 힘의 合力으로 생각할 수 있다. 즉,

$$F_i = F_{di} + F_{ai} + F_{bi} + F_{ci} + F_{ui}^+ + F_{ui}^- + F_{pi} \quad (4)$$

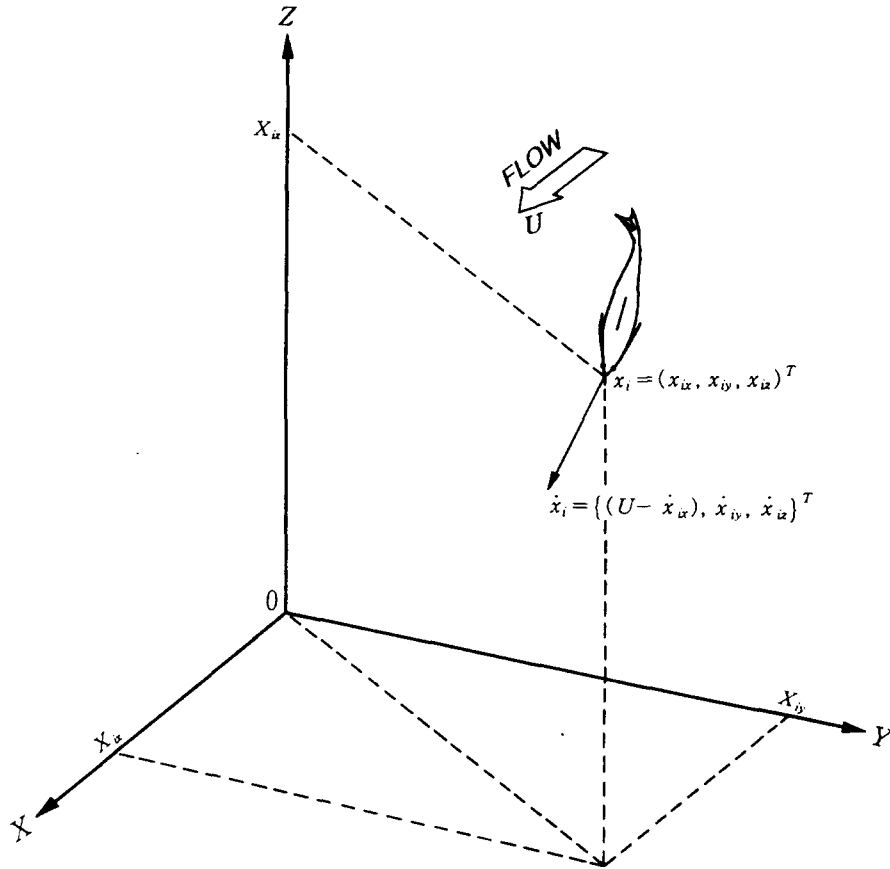


Fig. 2. Three - dimensional geometry of fish behavior.

이다. 여기서,

- F_{di} : 個體가 물로부터 받는 抵抗力
- F_{ai} : 個體의 前方推進力
- F_{bi} : 個體 사이의 誘引力
- F_{ci} : 成群力
- F_{wi}^- : 水槽 벽으로부터의 反撥力
- F_{wi}^+ : 水槽 벽으로부터의 引力
- F_{pi} : 方向場에 의한 힘

따라서, 魚群을 구성하고 있는 個體의 行動은 上記한 힘들과 外亂에 의한 힘 F_{ri} 의 線形結合에 의해 결정될 것이므로, 魚群을 구성하고 있는 각 個體를 質點으로 간주하여 魚群의 行動을 다음과 같이 質點系의 運動方程式으로 記述한다.

1. 抵抗力

임의의 크기의 고기가 x 軸 방향으로만 流速이 있는 水中에서 遊泳하고 있을 때, 각 個體가 물로부터 받는 抵抗力은 속도의 제곱에 비례하므로 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$F_{di} = -v \|\dot{x}_i\| \dot{x}_i \quad (5)$$

여기서, $\|\dot{x}_i\| = (\dot{x}_i^T \dot{x}_i)^{1/2}$ 이며, v 는 魚體의 抵抗係數로서 다음 式으로 구해진다.

$$v = 0.5\rho C_D A \quad (6)$$

式(6)에서

ρ : 물의 密度($1g/cm^3$)

C_D : 고기의 無次元化한 抵抗係數(≈ 0.1)

A : 흐름에 수직인 魚體의 最大斷面積

이며, 最大斷面積은 魚體의 斷面形狀을 다원형으로 近似하여 다음 式으로 略算하였다.

$$A = \frac{\pi h b}{4} \quad (7)$$

여기서, h 는 고기의 最大體高, b 는 고기의 最大體幅을 나타낸다.

2. 前方推進力

前方推進力은 각 個體가 고유한 속도로 항상 앞으로 나아가는 성질을 나타내며, 다음과 같이 나타내었다.

$$F_{ai} = a_i \frac{\dot{x}_i}{\|\dot{x}_i\|} \quad (8)$$

여기서, a_i 는 個體 i 의 遊泳能力을 나타내는 파라미터이다.

3. 個體 사이의 誘引力

群泳하고 있는 고기는 동료 個體와 적정 거리를 유지하기 위해 너무 떨어져 있을 때에는 誘引力이 작용하고, 임의의 거리 이내로 접근한 경우에는 反撥力이 작용한다. 이러한 個體 사이의 誘引力은 三宮(1993)에서와 같이 다음 式으로 나타내었다.

$$F_{bi} = k_{bi} \sum_{j \in M_c(i)} b_i(r_{ij}) \frac{x_j - x_i}{r_{ij}} \quad (9)$$

여기서, k_{bi} 는 個體 사이의 誘引力의 세기를 나타내는 파라미터이며, $r_{ij} = \|x_i - x_j\|$ 이다. $M_c(i)$ 는 行動空間이 벽, 出入口 등에 의해 部分空間으로 구획될 때 個體 i 와 동일한 部分空間에 존재하는 個體의 집합(N_b)을 나타내며, $1 \leq N_b$ 인 定數이다.

이 힘의 函數形 $b_i(r_{ij})$ 는

$$b_i(r_{ij}) = \frac{2(r_{ij}/\alpha - 1)}{(r_{ij}/\alpha - 1)^2 + 1} \quad \text{for } r_{ij} \leq \beta \quad (10)$$

로 假定하였다(梁 등 ; 1992, Matuda et al. ; 1993). 여기서, $b_i(r_{ij})$ 는 最大值가 1이고 最小值가 -1이며, $r_{ij} = 2\alpha$ 일 때 最大值를 나타낸다. 또한, α 는 反撥力과 誘引力의 轉換距離이며, β 는 이 힘의 作用領域을 나타낸다.

4. 成群力

群 속의 個體는 임의의 臨界距離 내에 있는 다른 個體와 서로 방향과 속도를 맞추려는 성질을 갖고 있는데, 이러한 성질을 나타내는 힘을 다음과 같이 假定하였다.

$$F_{ci} = k_{ci} \sum_{j \in M_c(i)} c_i(r_{ij}) \frac{\dot{x}_j - \dot{x}_i}{N_c} \quad (11)$$

여기서, $M_c(i)$ 는 個體 i 와 동일한 部分空間에 존재하는 個體의 집합(N_c)을 나타내며, $N_c \leq N_f - 1$ 인 定數이다. 단, $\dot{x}_i = \{(U - \dot{x}_{ix}), \dot{x}_{iy}, \dot{x}_{iz}\}^T$ 이고, $\dot{x}_j = \{(U - \dot{x}_{jx}), \dot{x}_{jy}, \dot{x}_{jz}\}^T$ 이다. 한편, 模型 그물을 설치한 경우에는 각 個體가 동일한 部分空間으로 구획되는 공간을 4개($M = 1 \sim 4$)로 定義하였다.

이 힘의 函數形 $c_i(r_{ij})$ 는

$$c_i(r_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left[\frac{1 - \cos \pi r_{ij} / \delta}{2} \right]^2 & \text{for } r_{ij} \leq \delta \\ 0 & \text{for } r_{ij} > \delta \end{cases} \quad (12)$$

로 나타내었다. 여기서, k_{ci} 는 파라미터이며, δ 는 成群力이 작용하는 臨界距離를 나타낸다.

5. 벽으로부터의 反撥力

이 힘은 Fig. 3에서와 같이 個體가 벽, 바닥 등에 가까워질 때 벽, 바닥 등으로부터 일정 거리 이내로 접근하면 벽, 바닥 등에 수직인 速度成分을 감소시켜 個體의 進行方向과 마주치게 될 벽, 바닥 등과 충돌을 피하려고 하는 성질을 나타내며, 다음 式으로 나타내었다.

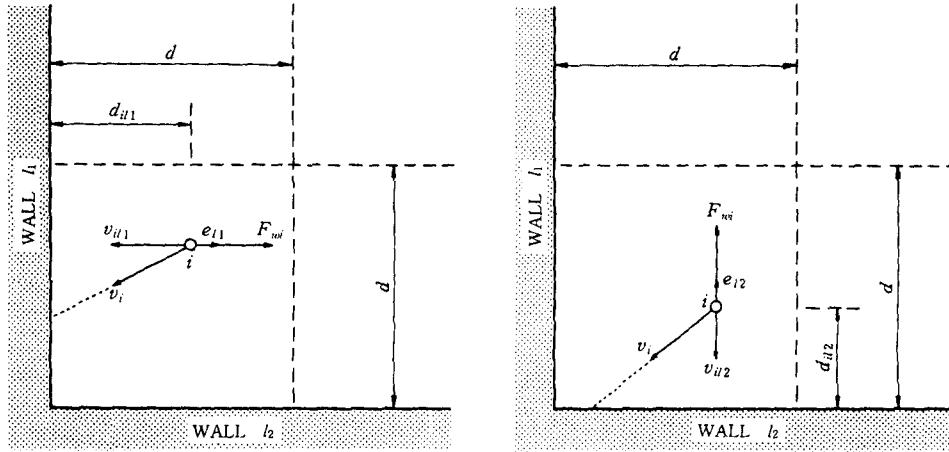
$$F_{wi}^+ = k_{wi}^+ \sum_{l=1}^L f_{wil}^+ \quad (13)$$

여기서, k_{wi}^+ 는 파라미터이며, L 은 行動空間을 구획하는 壁面의 수이다. 이 힘의 函數形 f_{wil}^+ 는 각 個體의 進行方向과 마주치게 되는 벽, 바닥 등에 대하여 X-Y 평면과 X-Z 평면으로 구분하여 적용하였다.

i. X-Y 평면에서는

$$f_{wil}^+ = \begin{cases} v_{il}(d^+ - d_{il})e_l & \text{for } v_{il} > 0 \text{ and } d_{il} < d^+ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

X-Y PLANE



X-Z PLANE

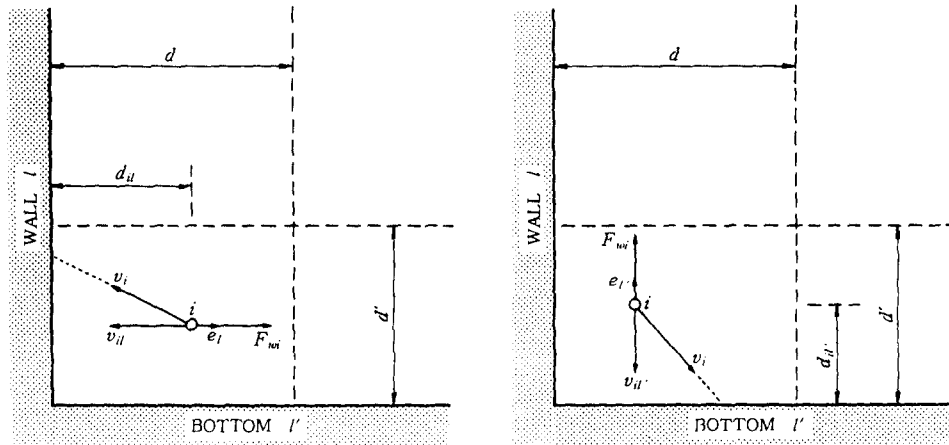


Fig. 3. Schematic diagram of the repulsive force against wall or bottom.

이다. 여기서, d_{ii} 은 個體 i 의 벽 l 로부터의 거리이며, d^* 는 이 힘이 작용하는 한계를 나타낸다. e_l 은 벽 l 에 대한 法線方向의 단위 벡터이며, v_{il} 은 벽 l 에 수직한 個體 i 의 速度成分, 즉 $v_{il} = -e_l^T x_i$ 이다.

ii. X-Z 평면에서는

$$f_{wi}^+ = \begin{cases} v_{il'}(d_{ii'}^* - d_{ii'})e_l' & \text{for } v_{il'} > 0 \text{ and } d_{ii'} < d_{ii'}^* \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (15)$$

이다. 여기서, $d_{ii'}$ 는 個體 i 의 바닥 l' 로부터의 거리이며, $d_{ii'}^*$ 는 이 힘이 작용하는 한계를 나타낸다. e_l'

는 바닥 l' 에 대한 法線方向의 단위 벡터이며, $v_{il'}$ 는 바닥 l' 에 수직한 個體 i 의 速度成分, 즉 $v_{il'} = -e_l'^T x_i$ 이다.

6. 벽으로부터의 引力

個體가 벽이나 바닥 등에서 임의의 거리만큼 떨어져 있을 때, 벽이나 바닥 등으로부터 일정 거리 내에 있는 경우에는 벽이나 바닥 등에 수직한 速度成分을 증가시켜 벽이나 바닥 등으로 접근하려는 성질을 나타내는 힘으로서 다음 式으로 나타내었다.

$$F_{wi}^- = k_{wi}^- \sum_{l=1}^L f_{wil}^- \quad (16)$$

여기서, k_{wi}^- 는 파라미터이며, f_{wil}^- 의 函數形은 벽으로부터의 誘引力에서와 같이 X-Y 평면과 X-Z 평면으로 구분하여 적용하였다.

i. X-Y 평면에서는

$$f_{wil}^- = \begin{cases} v_{il}(d^- - d_{il})e_l & \text{for } v_{il} < 0 \text{ and } d_{il} < d^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (17)$$

여기서, d^- 는 이 힘이 작용하는 영역의 한계를 나타낸다.

ii. X-Z 평면에서는

$$f_{wil}^- = \begin{cases} v_{il}'(d'^- - d_{il}')e_l' & \text{for } v_{il}' < 0 \text{ and } d_{il}' < d'^- \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (18)$$

여기서, d'^- 는 이 힘이 작용하는 영역의 한계를 나타낸다.

7. 方向場의 힘

個體는 向流性, 索餌性, 溫度集合性 혹은 外敵으로부터 멀어지려고 하는 성질 등 특정한 영역에서 임의의 방향으로 항할려고 하는 성질을 갖고 있다. 이러한 個體의 행동은 個體에 어떤 刺戟을 준 것과 같은 場이 존재하고, 그 場으로부터 받는 힘의 결과인 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 方向場의 힘으로서 다음과 같은 힘을 도입하였다.

$$F_{pi} = p_i e_p \quad \text{for } x_i \in X \quad (19)$$

여기서, e_p 는 場의 방향을 나타내는 단위 벡터이며, p_i 는 場의 세기를 나타내는 파라미터이다.

이 힘의 세기 p_i 가 작용하는 領域은 模型 그물을 설치하지 않은 경우에는 出入口가 없으므로 Fig. 4에서와 같이 水槽의 구석과 水流에 의한 方向場이 작용하는 기타 領域으로 구분하였고, 模型 그물을 설치한 경우에는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 出入口를 고려하여 다음과 같이 定義하였다.

i. 水槽의 구석에서는

$$p_i = \begin{cases} k_{pci} & \text{for } \dot{x}_i \leq v_c \\ 0 & \text{for } \dot{x}_i > v_c \end{cases} \quad (20)$$

여기서, k_{pci} 는 水槽의 구석에서의 場의 세기를 나타내는 파라미터이며, v_c 는 個體의 구석에서의 臨界游泳速度를 나타낸다.

ii. 模型 그물의 出入口 부근에서는

$$p_i = \begin{cases} k_{pei} & \text{for } v_{e1} \leq \dot{x}_i \leq v_{e2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (21)$$

여기서, k_{pei} 는 出入口 부근에서의 場의 세기를 나타내는 파라미터이며, v_{e1} 는 出入口 부근에서의 最小游泳速度, v_{e2} 는 출입구 부근에서의 最大游泳速度를 나타낸다.

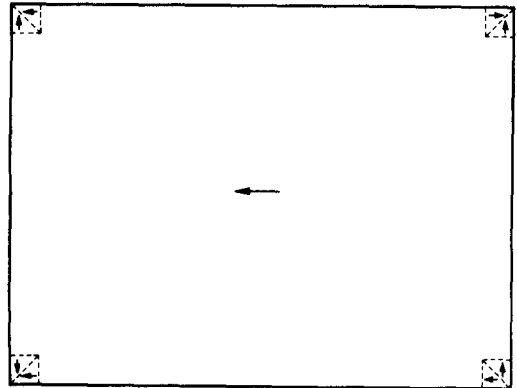


Fig. 4. Definition of the directional fields in the water tank without model net. Arrows indicate the direction of e_p in each region.

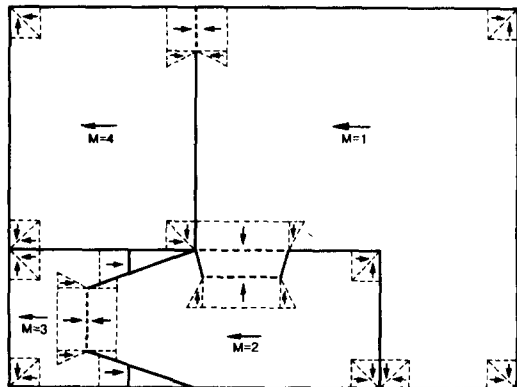


Fig. 5. Definition of the directional fields in the water tank with model net. Arrows indicate the direction of e_p in each region.

iii. 기타 領域에서는

$$p_i = \begin{cases} -k_{pei} \frac{U}{|U|} \dot{x}_i & \text{for } \dot{x}_i \geq U \\ 0 & \text{for } \dot{x}_i < U \end{cases} \quad (22)$$

여기서, k_{pei} 는 水槽의 각 구석이나 出入口 등의 領域을 제외한 모든 領域에서의 水流에 의한 場의 세기를 나타내는 파라메터이며, \dot{x}_i 는 각 個體의 遊泳速度이다.

8. 外亂에 의한 힘

個體 내부의 原因에 의한 個性的인 행동 및 上記의 모델 式에 표시한 이외의 原因不明에 의한 環境으로부터의 擾亂 등의 작용에 의해 個體가 받는 힘을 다음 式으로 나타내었다.

$$F_{ri} = \xi_i = (\xi_{ix}, \xi_{iy}, \xi_{iz})^T \quad (23)$$

여기서, $i(i=1, 2, \dots, N_f)$ 는 서로 독립적인 確率變數를 나타낸다.

數值 모델의 파라메터 同定方法

前述한 모델에 포함되어 있는 파라메터 중에서 m 및 v 는 사용하는 實驗魚로부터 計測할 수 있으며, $\alpha, \delta, d^+, d^-, d^+, d^-$ 등의 거리를 나타내는 파라메터는 水槽實驗의 觀測結果로부터 概算할 수 있다. 여기서는 각 個體의 平均値를 사용하였으며, 이들 파라메터를 既知의 파라메터로 취급하였다. 한편, 각 個體의 行動에 관계되는 外力의 크기를 나타내는 파라메터인 $a_i, k_{bi}, k_{ci}, k_{wi}^+, k_{wi}^-, p_i(k_{pei}, k_{pui})$ 및 k_{pui} 는 未知의 파라메터로서, 각 個體의 3차원 위치 時系列 데이터를 이용하여 最小自乘法으로 同定하였다.

水槽實驗에 의해 구해진 3차원 위치 時系列 데이터는 魚群行動의 畫像情報로부터 각 個體의 위치 벡터를 0.5초 간격으로 구한 것이기 때문에 이들 위치 벡터는 離散的인 時系列 데이터이므로, 外力을 나타내는 파라메터를 推定하기 위해서는 式(3)을 離散時間系로 변환시켜야 한다. 따라서, 時刻 $t=n\Delta t; n=0, 1, 2, \dots$ 에서의 위치 벡터 x_i 를 $x_i(n)$ 으로 표시하면, 個體의 속도 벡터 및 가속도

벡터는 前進差分하여 다음과 같이 近似할 수 있다.

$$\begin{cases} \dot{x}_i \equiv \frac{x_i(n+1) - x_i(n)}{\Delta t} \\ \ddot{x}_i \equiv \frac{x_i(n+2) - 2x_i(n+1) - x_i(n)}{(\Delta t)^2} \end{cases} \quad (24)$$

式(24)를 式(3)에 代入하면, 다음과 같은 出力方程式이 얻어진다.

$$\begin{aligned} x_i(n+2) = & 2x_i(n+1) - x_i(n) + \frac{(\Delta t)^2}{m} F_i [\\ & n\Delta t, x_1(t) \frac{x_1(n+1) - x_1(n)}{\Delta t}, x_2(n), \\ & \frac{x_2(n+1) - x_2(n)}{\Delta t}, \dots, x_{N_f}(n), \\ & \frac{x_{N_f}(n+1) - x_{N_f}(n)}{\Delta t}] \\ & i = 1, 2, \dots, N_f; n = 0, 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (25)$$

式(25)의 出力方程式이 線形으로 나타나므로, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x_i(n+2) = & H_i(n) + a_i H_{ai}(n) + k_{bi} H_{bi}(n) + \\ & k_{ci} H_{ci}(n) + k_{wi}^+ H_{wi}^+(n) + k_{wi}^- H_{wi}^-(n) \\ & (n) + p_i H_{pi}(n) + \xi_i(n) \end{aligned} \quad (26)$$

여기서, $H_i, H_{ai}, H_{bi}, H_{ci}, H_{wi}^+, H_{wi}^-, H_{pi}$ 는 3차원 벡터이며, 그 구체적인 函數形은 다음과 같다.

$$H_i(n) = 2x_i(n+1) - x_i(n) \frac{\sqrt{\Delta t}}{m} v_i(n) [x_i(n+1) - x_i(n)] \quad (27)$$

$$H_{ai}(n) = \frac{\Delta t}{m} \frac{x_i(n+1) - x_i(n)}{v_i(n)} \quad (28)$$

$$H_{bi}(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} \sum_{j \in N_b(i)} b_i(r_{ij}(n)) \frac{x_j(n) - x_i(n)}{r_{ij}(n)} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} H_{ci}(n) = & \frac{\Delta t}{m} \sum_{j \in N_c(i)} c_i(r_{ij}(n)) \\ & \frac{x_j(n+1) - x_j(n) - x_i(n+1) + x_i(n)}{M_c} \end{aligned} \quad (30)$$

$$H_{wi}^+(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} \sum_{l=1}^L f_{wil}^+(n) \quad (31)$$

$$H_{wi}^-(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} \sum_{l=1}^L f_{wil}^-(n) \quad (32)$$

$$H_{pi}(n) = \frac{(\Delta t)^2}{m} p_i e_p(n) \quad (33)$$

단,

$$v_i(n) = \frac{\|x_i(n+1) - x_i(n)\|}{\Delta t} \quad (34)$$

$$r_{ij}(n) = \|x_i(n) - x_j(n)\| \quad (35)$$

이다.

위 式들을 간단히 하기 위하여 다음과 같이 變數를 定義하면,

$$\theta \triangleq [a_i, k_{bi}, k_{ci}, k_{wi}^+, k_{wi}^-, p_i]^T \quad (36)$$

$$y_i(n) \triangleq [x_i^T(n+2) - H_i^T(n)]^T \quad (37)$$

$$\omega_i^T(n) \triangleq [H_{ai}(n), H_{bi}(n), H_{ci}(n), H_{wi}^+(n), H_{wi}^-(n), H_{pi}(n)] \quad (38)$$

$$i = 1, 2, \dots, N_f$$

$$\theta \triangleq [\theta_1^T, \theta_2^T, \dots, \theta_{N_f}^T]^T \quad (39)$$

$$y_n \triangleq [y_1^T(n), y_2^T(n), \dots, y_{N_f}^T(n)]^T \quad (40)$$

$$\xi_n \triangleq [\xi_1^T(n), \xi_2^T(n), \dots, \xi_{N_f}^T(n)]^T \quad (41)$$

$$\Omega_n^T \triangleq \text{diag}[\omega_1^T(n), \omega_2^T(n), \dots, \omega_{N_f}^T(n)]^T \quad (42)$$

式 (26)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_n = \Omega_n^T \theta + \xi_n \quad (43)$$

따라서, 式 (43)에서의 각 파라메터의 推定值 $\hat{\theta}$ 는 逐次形 最小自乘法으로 다음 式에 의해 구해진다(相良 등; 1981).

$$\hat{\theta} = \left(\sum_{n=1}^{N_f} \Omega_n \Omega_n^T \right)^{-1} \sum_{n=1}^{N_f} \Omega_n y_n \quad (44)$$

또한, 時刻 $t = n\Delta t$ 까지의 위치 벡터의 時系列 데이터에 의해 추정되는 未知의 係數를 θ_n 이라 하면, 逐次形 最小自乘法의 알고리즘은 다음과 같다.

$$\begin{cases} \hat{\theta}_n = \hat{\theta}_{n-1} + P_n \Omega_n (y_n - \Omega_n^T \hat{\theta}_{n-1}) \\ P_n = R_n^{-1} \\ R_n = R_{n-1} \Omega_n \Omega_n^T \end{cases} \quad (45)$$

여기서, $R_0 = \lambda I (0 < \lambda \ll 1)$ 및 $\hat{\theta}_0 = 0$ 이다.

따라서, $F_{ri} = \xi_n = r_n$ 이라 하면, 外亂에 의한 힘은 式 (43)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_n = y_n - \omega_n^T \theta \quad (46)$$

이상과 같이 각 時刻에 있어서 각 個體의 位置座標 $x_i(n+2), x_i(n+1), x_i(n), \dots$ ($n=0, 1, 2, \dots; i=1, 2, \dots, N_f$)를 이용하여 同定한 결과로부터 파라메터 $a_i, k_{bi}, k_{ci}, k_{wi}^+, k_{wi}^-, p_i$ 의 收斂值 $\hat{\theta}^*$ 를 구할 수 있으며, 式 (26)에서의 外亂에 의한 힘 $\xi_i(n)$ 은 式 (46)으로 推定할 수 있다.

모델의 파라메터 推定

魚群行動을 나타내는 모델의 파라메터 중에서 m 및 v 는 實驗에 사용한 魚體로부터 計測이 가능하다. 또한, 距離를 나타내는 파라메터인 $\alpha, \delta, d^+, d^{**}, d^-, d^-$ 는 水槽實驗에 의한 관찰결과로부터 概算할 수 있으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다.

또한, 外力의 크기를 나타내는 파라메터 $a_i, k_{bi}, k_{ci}, k_{wi}^+, k_{wi}^-, p_i$ (k_{pci}, k_{pci} 및 k_{pui})는 前述한 바와 같이 個體 및 魚群의 3차원 위치 時系列 데이터를 이용하여 最小自乘法으로 同定함으로써 구할 수 있으며, 同定한 결과의 平均値를 Table 4 및 Table 5에 나타내었다. Fig. 6 및 Fig. 7은 각각 模型 그물을 설치하지 않은 경우와 模型 그물을 설치한 경우에 있어서 魚群($N_f=10$)의 위치 時系列 데이터와 Table 3에 나타낸 既知의 파라메터들을 이용하여 式 (44)에 의해 구한 파라메터의 推定值에 대한 收斂狀態를 나타낸 결과의 한 예이다. 여기에 나타나

Table 3. Values of known parameters by the experiment in the water tank

Experiment	$m(g)$	$v(g/cm)$	$\alpha(cm)$	$\delta(cm)$	$d^+(cm)$	$d^{**}(cm)$	$d^-(cm)$	$d^-(cm)$
without model net	8.6	0.07	5	30	19.5	9	40	22.5
with model net	7.9	0.07	2	18	7.5	9	17	22.5

notes ; m mean weight, v drag coefficient, α range in which mutual repulsion acts, δ critical distance for schooling force, d^- and d^{**} critical distance in which repulsive force against wall or bottom, d^- and d^+ critical distance in which attractive force against wall or bottom.

Table 4. Estimated mean values of the model parameters by the experiment used in water tank without model net

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	Estimated parameters						
		a (gcm/s ²)	k_b (gcm/s ²)	k_c (g/s)	k_w^+ (g/s)	k_w^- (g/s)	k_{pc} (gcm/s ²)	k_{pu} (g/s)
0	1	146.2	-	-	3.8	-0.1	92.8	-
	2	71.7	77.7	5.0	3.1	-0.1	344.8	-
	3	80.3	56.5	8.4	2.8	-0.1	-	-
	5	59.2	39.2	7.1	2.5	-0.1	-	-
	7	51.3	29.7	10.4	1.7	-0.1	15.0	-
	10	52.7	19.2	12.5	2.0	-0.1	87.6	-
5	10	30.6	14.9	6.2	2.0	-0.1	-0.4	2.0
10	10	20.5	10.7	7.5	5.2	0.1	4.5	5.3
15	10	44.0	14.6	8.5	1.6	-0.1	12.9	3.2
20	10	39.0	16.4	10.1	2.2	-0.1	28.2	5.4
25	10	26.0	15.0	10.1	0.5	-0.1	50.2	5.0

Table 5. Estimated mean values of the model parameters by the experiment used in water tank with model net

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	Estimated parameters							
		a (gcm/s ²)	k_b (gcm/s ²)	k_c (g/s)	k_w^+ (g/s)	k_w^- (g/s)	k_{pc} (gcm/s ²)	k_{pe} (gcm/s ²)	k_{pu} (g/s)
0	1	62.7	-	-	9.6	0.2	-	48.6	-
	2	73.9	92.1	4.9	6.2	0.2	-	29.1	-
	3	74.2	82.5	6.0	4.5	-0.4	-	-80.8	-
	5	48.8	45.8	7.0	7.7	0.2	-	15.0	-
	7	65.9	46.7	5.3	4.2	-0.3	-	17.9	-
	10	70.5	40.6	4.9	2.9	0.2	7.1	-55.9	-
5	10	42.3	19.4	6.5	3.4	0.2	-27.6	29.9	3.1
10	10	37.9	16.1	12.3	6.2	0.1	-37.6	-6.5	4.5
15	10	48.3	17.7	5.0	5.9	-0.1	3.9	11.9	5.4
20	10	45.2	17.9	6.6	10.3	0.1	19.8	-2.8	8.6
25	10	38.5	5.1	7.9	6.0	-0.2	-10.9	4.9	7.5

있는 파라미터의 推定值들의 ± 符號는 數值 모델 을 구성하는 각종 運動要因들의 基準座標系에 대한 作用方向을 나타낸다.

그러나, 여기서 구해진 서로 다른 힘들의 係數를 직접, 단순하게 비교하기는 곤란하다. 즉, 구할 수 있는 觀測值 H_{ai} , H_{bi} , H_{ci} , H_{wi}^+ , H_{wi}^- , H_{pi} 의 測定單位가 서로 다르기 때문이다. 따라서, 서로 다른 係數를 비교하기 위하여서는 각 變量을 平均이 0 이고 分散이 1이 되게 통일하여 標準化할 필요가 있다.

그러므로,

$$s_i(n+2) = x_i(n+2) - 2x_i(n+1) + x_i(n) \quad (47)$$

$$H_i = \frac{(\Delta t)^2}{m} F_{di} \quad (48)$$

이라 하고, 실제의 3차원 위치 時系列 데이터로부터 얻어진 觀測值 s_i 에 대하여 外亂에 의한 힘을 제외한 힘만으로 魚群行動을 설명할 수 있는 推定值를 S_i 라 하면, 式(26)은

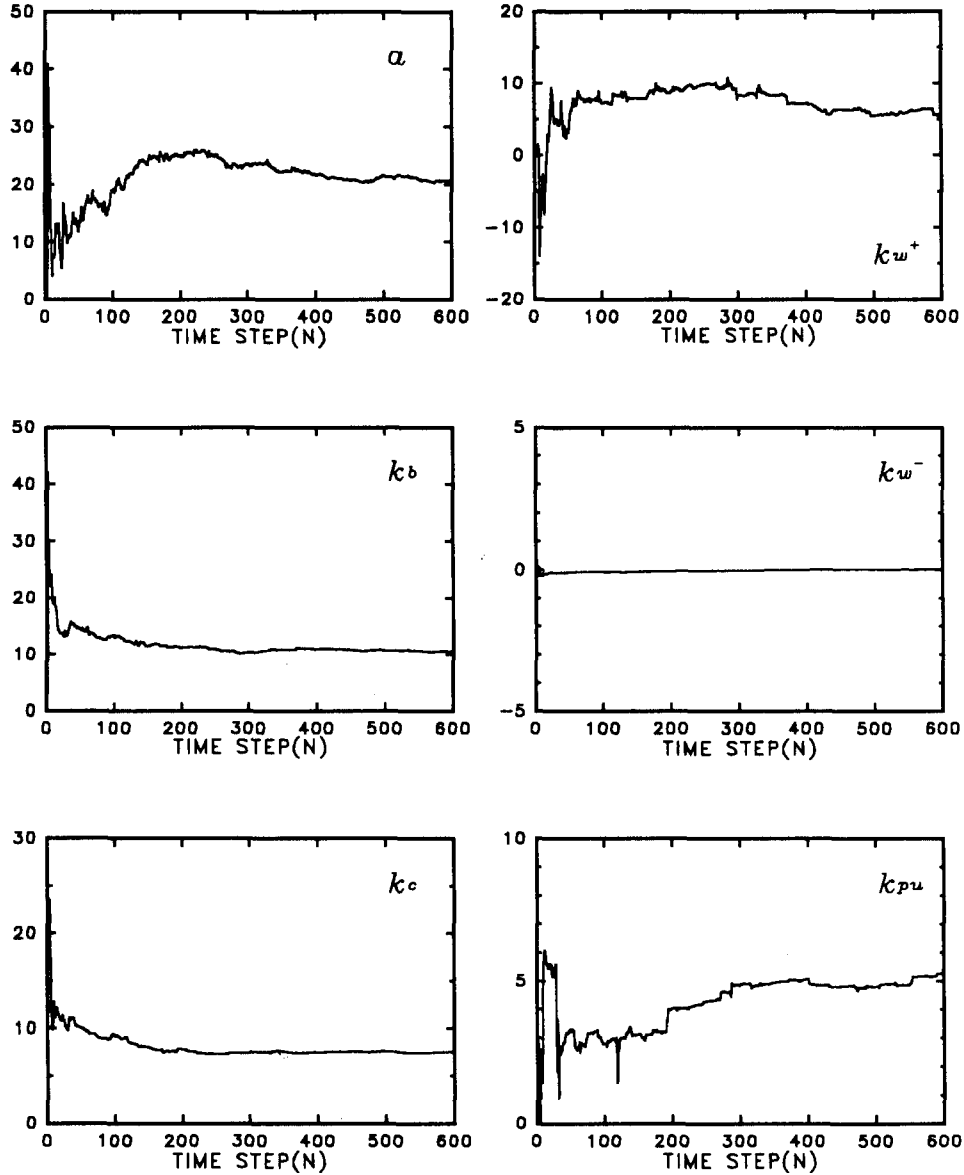


Fig. 6. Convergent phases of the estimated parameters by the experiment in the water tank without model net at flow speed 10cm/sec.

$$S_i(n+2) = -vH_i(n) + a_iH_{ai}(n) + k_{bi}H_{bi}(n) + k_{ci}H_{ci}(n) + k_{wi}^+H_{wi}^+(n) + k_{wi}^-H_{wi}^-(n) + p_iH_{pi}(n) \quad (49)$$

으로 바꾸어 쓸 수 있다. 式 (49)에서 $S_i, H_i, H_{ai}, H_{bi}, H_{ci}, H_{wi}^+, H_{wi}^-, H_{pi}$ 의 각 變量을 각 個體의 x, y, z 成分에 대하여 標準化하면, 다음 式으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} S_i^* &= \frac{S_i - \bar{S}_i}{\sigma_{S_i}}, & H_i^* &= \frac{H_i - \bar{H}_i}{\sigma_{H_i}}, \\ H_{ai}^* &= \frac{H_{ai} - \bar{H}_{ai}}{\sigma_{H_{ai}}}, & H_{bi}^* &= \frac{H_{bi} - \bar{H}_{bi}}{\sigma_{H_{bi}}}, \\ H_{ci}^* &= \frac{H_{ci} - \bar{H}_{ci}}{\sigma_{H_{ci}}}, & H_{wi}^{*+} &= \frac{H_{wi}^+ - \bar{H}_{wi}^+}{\sigma_{H_{wi}^+}}, \\ H_{wi}^{*-} &= \frac{H_{wi}^- - \bar{H}_{wi}^-}{\sigma_{H_{wi}^-}}, & H_{pi}^* &= \frac{H_{pi} - \bar{H}_{pi}}{\sigma_{H_{pi}}} \end{aligned} \quad (50)$$

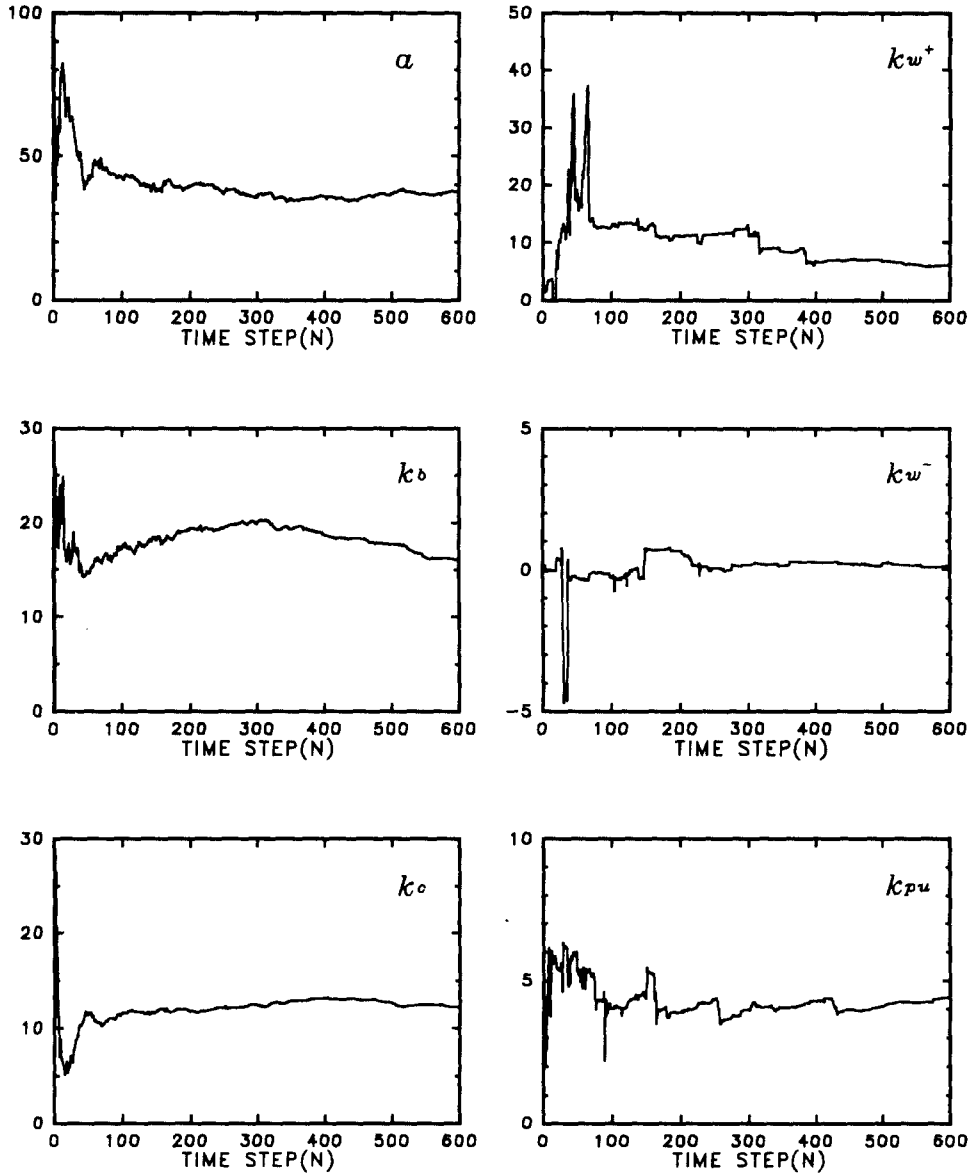


Fig. 7. Convergent phases of the estimated parameters by the experiment in the water tank with model net at flow speed 10cm/sec.

여기서, σ_{Si} , σ_i , σ_{ai} , σ_{bi} , σ_{ci} , σ_{wi}^+ , σ_{wi}^- , σ_{pi} 는 각각 S_i , H_i , H_{ai} , H_{bi} , H_{ci} , H_{wi}^+ , H_{wi}^- , H_{pi} 의 標準偏差이다.

따라서, 式 (49)에서의 各 變量을 上記한 바와 같이 標準化하면,

$$S_i^* = \frac{S_i - \bar{S}_i}{\sigma_{Si}} = -v \frac{\sigma_i}{\sigma_{Si}} H_i^* + a \frac{\sigma_{ai}}{\sigma_{Si}} H_{ai}^* + k_{bi} \frac{\sigma_{bi}}{\sigma_{Si}} H_{bi}^*$$

$$\begin{aligned} & + k_{bi}^- \frac{\sigma_{bi}^-}{\sigma_{Si}} H_{ai}^{-*} + k_{ci} \frac{\sigma_{ci}}{\sigma_{Si}} H_{ci}^* + k_{wi}^+ \frac{\sigma_{wi}^+}{\sigma_{Si}} H_{wi}^{+*} \\ & + k_{wi}^- \frac{\sigma_{wi}^-}{\sigma_{Si}} H_{wi}^{-*} + p_i \frac{\sigma_{pi}}{\sigma_{Si}} H_{pi}^* \\ = & +v^* H_i^* + a^* H_{ai}^* + k_{bi}^* H_{bi}^* + k_{ci}^* H_{ci}^* \\ & + k_{wi}^* H_{wi}^{+*} + k_{wi}^{-*} H_{wi}^{-*} + p_i^* H_{pi}^* \end{aligned} \quad (51)$$

이 되므로, 힘의 크기를 나타내는 파라미터도 v^* , a^* , kb^* , kc^* , kw^{+*} , kw^{-*} , $p^*(k_{pc}^*, k_{pe}^*$ 및 $k_{pu}^*)$ 로 표준화하면 이들의 값을 비교할 수 있다.

이러한 방법으로 파라미터 값을 표준화한 결과는 Table 6 및 Table 7과 같으며, 個體數 및 流速에 따라 표준화한 파라미터 값을 비교하여 나타낸 것은 Fig. 8 및 Fig. 9와 같다.

1. 個體數에 따른 파라미터의 比較

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 표준화한 파라미터 값의 個體數에 따른 변화를 살펴보면, 個體의 前方推進力의 크기를 나타내는 파라미터 a^* 는 模型 그

물이 없는 경우에는 個體數가 많아짐에 따라 대체로 작아지는 경향을 나타내었으나, 模型 그물이 있는 경우에는 대체로 일정한 것으로 나타났다.

個體 사이의 影響力의 크기를 나타내는 파라미터 kb^* 와 成群力의 크기를 나타내는 파라미터 kc^* 는 模型 그물이 없는 경우에는 個體數가 많아짐에 따라 대체로 커지는 경향을 나타내었으나, 模型 그물이 있는 경우에는 대체로 일정한 것으로 나타났다.

水槽의 벽이나 바닥 등에 대한 反撥力과 誘引力의 크기를 나타내는 파라미터 $|kw^{+*}|$ 와 $|kw^{-*}|$ 는 다른 파라미터에 비해 그 값이 매우 작았으며,

Table 6. Standardized mean values of the model parameters by the experiment used in the water tank without model net

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	Standardized parameters							
		a^*	kb^*	kc^*	kw^{+*}	kw^{-*}	k_{pc}^*	k_{pe}^*	v^*
0	1	2.41	-	-	0.15	-0.45	0.03	-	0.76
	2	1.20	1.03	2.01	0.05	-0.54	0.07	-	0.64
	3	1.45	0.80	1.78	0.17	-0.35	-	-	0.49
	5	0.80	1.02	1.63	0.13	0.03	-	-	0.47
	7	0.49	1.61	2.16	0.15	-0.35	-	-	0.64
	10	0.81	1.67	2.32	0.25	-0.33	-	-	0.60
5	10	0.70	1.08	1.20	0.06	-0.01	-0.11	0.15	0.44
10	10	0.44	0.90	1.75	0.01	0.08	0.20	0.29	0.75
15	10	0.54	0.75	2.33	0.04	0.08	0.05	0.11	0.80
20	10	0.49	0.89	1.84	0.01	0.16	0.28	0.26	0.67
25	10	0.40	0.92	2.52	0.04	-0.19	0.56	0.30	0.61

Table 7. Standardized mean values of the model parameters by the experiment used in the water tank with model net

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	Standardized parameters								
		a^*	kb^*	kc^*	kw^{+*}	kw^{-*}	k_{pc}^*	k_{pe}^*	k_{pu}^*	v^*
0	1	2.02	-	-	0.69	0.12	-	0.19	-	0.56
	2	1.95	1.20	1.04	0.73	0.05	-	0.05	-	0.64
	3	1.88	0.94	0.64	0.37	-0.06	-	-0.08	-	0.45
	5	1.49	1.32	0.64	0.41	-0.05	-	-0.06	-	0.57
	7	1.91	1.35	0.67	0.41	0.02	-	-0.07	-	0.67
	10	1.99	1.14	0.82	0.74	0.09	-	-0.01	-	0.65
5	10	1.27	0.40	1.19	0.51	0.19	-0.04	0.05	0.31	0.50
10	10	0.70	0.64	1.21	0.46	0.04	0.05	0.01	0.13	0.42
15	10	1.25	0.43	0.95	-0.36	0.04	0.23	0.01	0.32	0.63
20	10	1.16	0.46	1.25	0.18	0.04	-0.17	-0.10	0.35	0.54
25	10	1.07	0.41	1.52	0.12	0.10	0.01	0.17	0.16	0.48

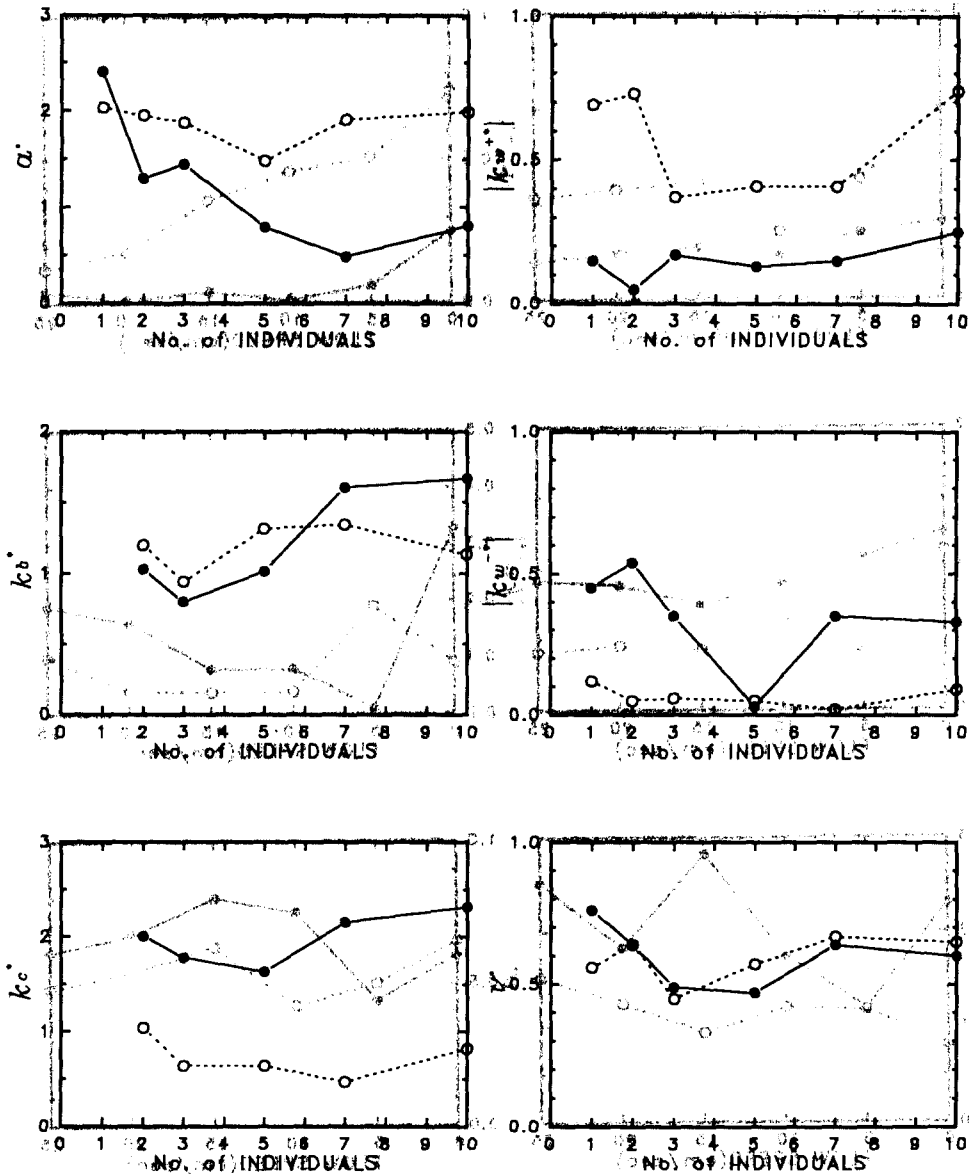


Fig. 8. Relationship between standardized values of parameters and number of individuals.

—●— : experiment in the water tank without model net. (a) (b) (c)
○..... : experiment in the water tank with model net. (a) (b) (c)

$|k_{ab}^*|$ 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 個體數가 많아짐에 따라 다소 커지는 경향을 나타내었다. 또한, $|k_{cb}^*|$ 는 模型 그물이 없는 경우에는 個體數가 많아짐에 따라 다소 작아지는 경향을 나타내었으나, 模型 그물이 있는 경우에는 큰 차이가 없었다. (a) (b) (c) 한편, 각 個體의 遊泳行動으로 인한 抵抗力의 크

기를 나타내는 파라메터 k_c^* 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 個體數가 많아짐에 따라 커지는 경향을 나타내었다. (a) (b) (c) 個體數에 따른 파라메터는 模型 그물이 없는 경우에는 個體數가 높을수록 個體 사이에 작용하는 誘引力의 크기를 나타내는 파라메터 k_b^* 및 成群力의 크기를 나타내는 파라메터 k_c^* 가 상대적으로

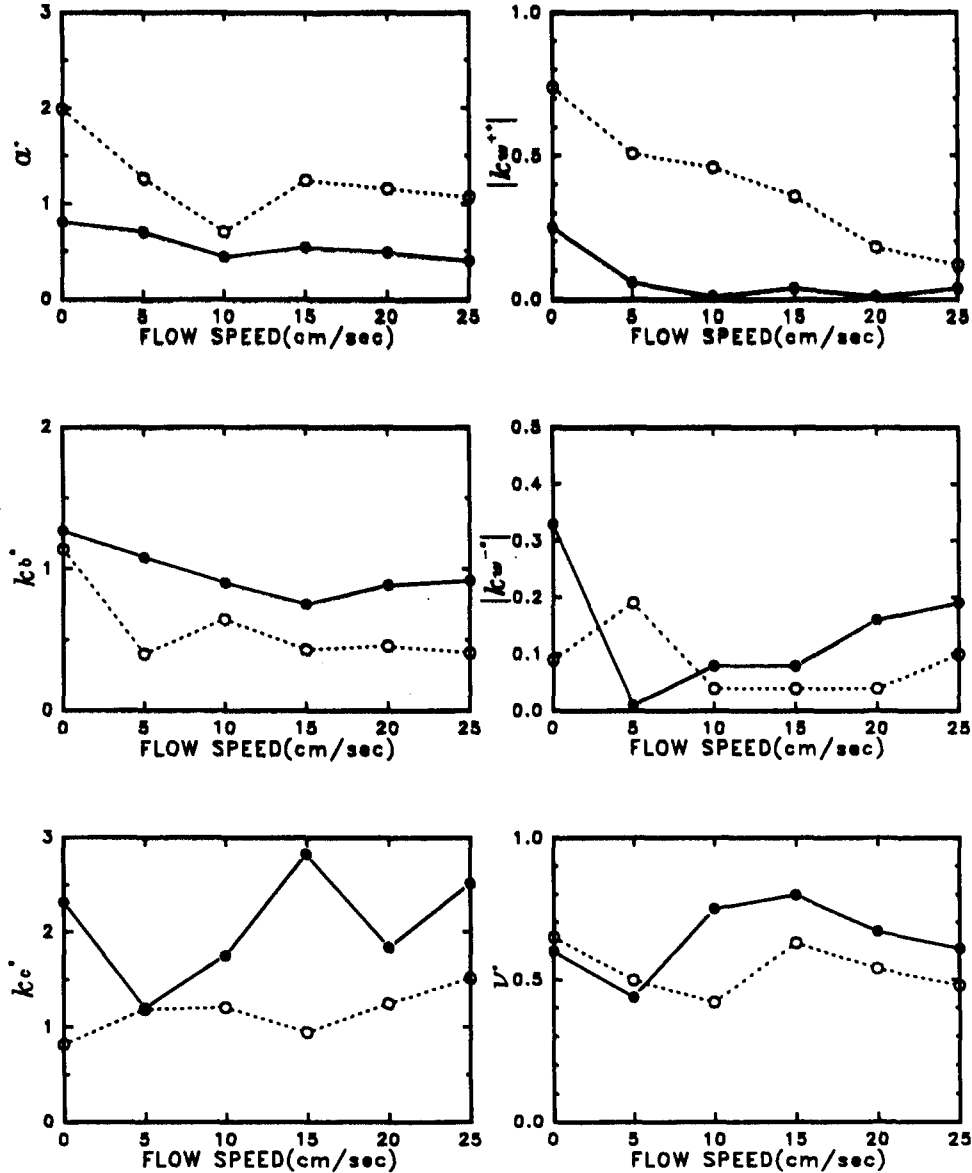


Fig. 9. Relationship between standardized values of parameters and flow speed.

—●— : experiment in the water tank without model net,

...○... : experiment in the water tank with model net.

크게 작용함으로서, 魚群의 遊泳行動 중 前方推進力의 크기를 나타내는 파라미터 a^* 가 차지하는 비중이 작아졌기 때문에 생각된다. 한편, 模型 그물이 있는 경우에는 模型 그물에 의해 遊泳空間이 區劃되므로, 模型 그물이 없는 경우에 비해 遊泳空間이 좁아져서 遊泳行動에 제약을 받아 個體數가 많아져도 파라미터 a^* , k_b^* , k_c^* 등의 변화가 적었

던 것으로 생각된다. 水槽의 벽이나 바닥 등에 대한 反撥力과 誘引力의 크기를 나타내는 파라미터 $|k_w^{+*}|$ 및 $|k_w^{-*}|$ 는 다른 파라미터에 비해 그 값이 매우 작으나, $|k_w^{+*}|$ 및 $|k_w^{-*}|$ 는 각 個體의 瞬間遊泳速度, 그 때의 水槽 벽이나 바닥 등과 각 個體 사이의 거리 및 벽이나 바닥으로의 接近角度 등에 관계되므로 변화가 큰 것으로 생각

된다. 또한, 抵抗力의 크기를 나타내는 파라미터 v^* 는 일반적으로 游泳速度가 빨라지면 커지는데, 個體數가 많을수록 游泳速度가 다소 빨라지기 때문에 v^* 가 커지는 경향을 나타낸 것으로 생각된다.

2. 流速에 따른 파라미터의 比較

Fig. 9에 나타낸 바와 같이 標準化한 파라미터 값의 流速에 따른 변화를 살펴보면, 個體의 前方推進力의 크기를 나타내는 파라미터 a^* 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 流速이 빨라질수록 대체로 작아지는 경향을 나타내었다.

個體 사이의 影響力의 크기를 나타내는 파라미터 kb^* 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 流速이 빨라질수록 작아지는 경향을 나타내었으나, 成群力의 크기를 나타내는 파라미터 kc^* 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 流速이 빨라짐에 따라 대체로 커지는 것으로 나타났다.

水槽의 벽이나 바닥 등에 대한 反撥力의 크기를 나타내는 파라미터 $|kw^{**}|$ 는 模型 그물이 없는 경우에는 流速의 변화에 따른 차이가 없는 것으로 나타났으나, 模型 그물이 있는 경우에는 작아지는 것으로 나타났다. 또한, 誘引力의 크기를 나타내는 파라미터 $|kw^{*}|$ 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 流速이 빨라짐에 따라 대체로 커지는 경향을 나타내었다.

한편, 각 個體의 游泳行動으로 인한 抵抗力의 크기를 나타내는 파라미터 v^* 는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 流速이 빨라짐에 따라 작아지는 경향을 나타내었다.

流速에 따른 파라미터는 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 流速이 빨라질수록 각 個體의 游泳速度도 증가하여 游泳速度와 관계되는 파라미터가 커질 것으로 예상되나, 流速이 빨라짐에 따라 각 個體 사이의 成群力의 크기를 나타내는 파라미터 kc^* 가 상대적으로 커져서 밀집된 群을 형성하여 游泳함으로써 파라미터 a^* , kb^* , $|kw^{**}|$, $|kw^{*}|$, v^* 등은 상대적으로 작아지는 것으로 생각된다.

要 約

魚群行動의 推定 및 制御 등을 위한 基礎資料의 제공과 魚群行動의 모델링 技法을 現場에 적용하기 위한 가능성을 모색하기 위하여 魚群行動을 나타내는 數值 모델을 作成하고, 流速이 있는 實驗水槽에서 游泳하는 무지개송어를 대상으로 個體 및 魚群의 3차원 위치 時系列 데이터를 이용하여 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 파라미터를 最小自乘法으로 推定하였다.

魚群行動을 나타내는 數值 모델의 個體數 및 流速에 따른 파라미터 값의 변화를 조사하기 위하여 推定한 파라미터 값을 平均이 0이고, 分散이 1이 되게 파라미터를 標準化하여 比較한 結果를 要約하면 다음과 같다.

(1) 個體의 前方推進力의 크기를 나타내는 파라미터 a^* 는 個體數 및 流速이 증가함에 따라 대체로 작아지는 경향을 나타내었다.

(2) 個體 사이의 影響力의 크기를 나타내는 파라미터 kb^* 는 個體數가 많아짐에 따라 대체로 커지는 경향을 나타내었으나, 流速이 빠를수록 대체로 작아지는 것으로 나타났다.

(3) 成群力의 크기를 나타내는 파라미터 kc^* 는 個體數 및 流速이 증가함에 따라 대체로 커지는 경향을 나타내었다.

(4) 水槽의 벽이나 바닥 등에 대한 反撥力의 크기를 나타내는 파라미터 $|kw^{**}|$ 는 個體數가 많아짐에 따라 다소 커졌으나, 流速이 빠를수록 작아지는 것으로 나타났다.

(5) 水槽의 벽이나 바닥 등에 대한 誘引力의 크기를 나타내는 파라미터 $|kw^{*}|$ 는 個體數에 관계없이 대체로 일정한 것으로 나타났으나, 流速이 빠를수록 대체로 커지는 경향을 나타내었다.

(6) 抵抗力의 크기를 나타내는 파라미터 v^* 는 個體數가 많아짐에 따라 다소 커지는 경향을 나타내었으나, 流速이 빠를수록 작아지는 것으로 나타났다.

參考文獻

Aoki, I.(1982) : A Simulation Study on the Schooling

- Mechanism in Fish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 48(8), 1081 - 1088.
- Aoki, I.(1986) : A Simulation Experiment on Individual Differences in Schooling Behaviour of Fish. *Nippon Suisan Gakkaishi* 52(7), 1115 - 1119.
- Balchen, J. G.(1972) : Feedback Control of Schooling Fish. *Proc. IFAC 5th World Congr.*, June, Paper 14.3.
- Balchen, J. G.(1975) : Mathematical Modelling of Fish Behaviour, Principles and Applications. *Proc. IFAC 6th World Congr.*, Aug., Paper 54.1.
- Balchen, J. G.(1976) : Modelling of the Biological State of Fishes. *Found. of Sci. and Ind. Res. (SINTEF), STF48 A76023*, Trondheim, Norway.
- Balchen, J. G.(1981) : Recent Progress in the Control of Fish Behavior. *Proc. IFAC 8th World Congr.*, Paper 72.4.
- Breder, C. M.(1954) : Equations Descriptive of Fish Schools and other Animal Aggregations. *Ecology* 35(3), 361 - 370.
- Breder, C. M.(1959) : Studies on Social Groupings in Fishes. *Bull. Amer. Mus. Natural Hist.* 117(6), 393 - 482.
- Inagaki, T., W. Sakamoto and T. Kuroki(1976) : Studies on the Schooling Behavior of Fish - II, Mathematical Modeling of Schooling Form depending on the Intensity of Mutual Force between Individuals. *Nippon Suisan Gakkaishi* 42(3), 265 - 270.
- Matuda, K. and N. Sannomiya(1980) : Computer Simulation of Fish Behavior in Relation to Fishing Gear - I, Mathematical Model of Fish Behavior. *Nippon Suisan Gakkaishi* 46(6), 689 - 697.
- Matuda, K., Z. Liang and N. Sannomiya(1993) : Comparison among fish species of parameters in a fish behaviour model. *ICES mar. Sci. Symp.* 196, 103 - 107.
- Sakamoto, W., I. Aoki and T. Kuroki(1975) : Studies on the Schooling Behavior of Fish - I, Spectral Analysis of Interaction between Two Individuals of Fish in Locomotion. *Nippon Suisan Gakkaishi* 41(9), 945 - 952.
- Sannomiya, N. and K. Matuda(1984) : A Mathematical Model of Fish Behavior in a Water Tank. *IEEE Trans. Systems Man Cybern.* 14(1), 157 - 162.
- Sannomiya, N. and K. Matuda(1987) : Least Squares Parameter Estimation in Fish Behavior Model. *Nippon Suisan Gakkaishi* 53(11), 1951 - 1957.
- 高木 力・梨本勝昭・山本勝太郎・平石智徳(1993) : 形状と大きさの異なる水槽内における魚群行動について. *Nippon Suisan Gakkaishi* 59(8), 1279 - 1287.
- 三宮信夫(1993) : 魚群行動モデル. システム/制御/情報 37(12), 696 - 703.
- 三宮信夫・メハディヌリシラジ・石崎一成(1986) : 水槽実験データによる魚群行動モデルの検討. 電子通信學會論文誌 *NLP* 85 - 48, 9 - 16.
- 三宮信夫・中峯 浩・岩崎永彌(1990) : 魚群行動を表わす物理モデルの妥当性の検討. システム制御情報學會論文誌 3(1), 1 - 20.
- 三浦汀介(1978) : 漁具研究へのシステム工学的アプローチ - I, トラップ・モデル. *Nippon Suisan Gakkaishi* 44(8), 835 - 841.
- 三浦汀介(1979a) : 漁具研究へのシステム工学的アプローチ - II, トラップ内での魚群行動のモデリングとシミュレーション. *Nippon Suisan Gakkaishi* 45(1), 17 - 23.
- 三浦汀介(1979b) : 漁具研究へのシステム工学的アプローチ - III, “カエシ”付トラップ・モデル. *Nippon Suisan Gakkaishi* 45(6), 673 - 676.
- 三浦汀介(1981) : 定置網などにみられる多重構造のトラップ・モデル. *Nippon Suisan Gakkaishi* 47(11), 1401 - 1409.
- 三浦汀介・清水 晋(1983) : 数種の魚種に對するトラップ・モデルの推定. *Nippon Suisan Gakkaishi* 49(9), 1355 - 1360.
- 三浦汀介・清水 晋・西山作藏・佐藤 修(1986) : トラップ内での魚の行動解析に關する一考察. *Nippon Suisan Gakkaishi* 52(7), 1107 - 1113.
- 三浦汀介・清水 晋・笹川康雄(1989) : 定置網類のコンパートメント型モデルによるシミュレーション. *Nippon Suisan Gakkaishi* 55(12), 2115 - 2118.
- 相良節夫・秋月影雄・中溝高好・片山 徹(1981) : システム同定. 計測自動制御學會, 東京, pp. 116 - 121.
- 梁振林・松田 皎・三宮信夫(1992) : ウグイの水槽実験データによる魚群行動モデルの考察. *Nippon Suisan Gakkaishi* 58(5), 853 - 860.
- 梁振林・松田 皎・東海 正(1994) : 定置網構造に對する魚群行動のモデリング. *Nippon Suisan Gakkaishi*

模型 그물에 대한 魚群行動의 數值 모델링에 관한 研究

60(2), 185 - 191.
李秉錡 · 朴丞源 · 金鎮乾(1989) : 沿近海漁業概論(三訂
版). 太和出版社, 釜山, pp. 190 - 193.
李秉錡 · 李吳在 · 張鎬榮 · 金錫載(1995) : 模型 그물에

대한 魚群行動의 數值 모델링에 관한 研究, 模型 그
물이 없는 水槽에서의 무지개송어의 遊泳特性. 漁業
技術 31(1), 74 - 83.