

模型 그물에 대한 魚群行動의 數值 모델링에 관한 研究*

- 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 妥當性 檢討 -

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* - Examination on the Validity of a 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 this paper, the validity of the numerical model of fishes' behavior presented in our earlier paper was examined by the whiteness test on the residual of numerical model and by the comparison between experiment and simulation on several indexes represented by fishes' swimming characteristics.

The validity of the numerical model was proved statistically by means of the whiteness test of the residual. The similarity was confirmed by comparison between experiment and simulation for the swimming trajectory of fishes, the mean distance of individual from wall, the mean swimming speed and the mean distance between the nearest individuals.

These results suggest that the behavior of fishes according to the flow speed in three - dimensional space can be estimated partially by the numerical model presented in our earlier paper. However, a long - term approach to improve the modeling technique on the behavior of fishes may be needed before applying the numerical model presented in our earlier paper to real fishing ground.

序 言

最近 시스템 工學의 技法이 工學 이외의 分野에 있어서도 시스템의 設計, 計劃, 運用 등의 問題를 해결하기 위하여 적용되고 있다. 그 典型的인 例로서는 社會 시스템과 같은 人間의 意思決定에 관한 問題와 生態 시스템과 같은 生物의 行動이나 成長 過程을 모델化하여 考察하는 問題를 들 수 있다.

魚群行動의 모델링 技法을 現場에 적용하기 위한 可能性을 모색하기 위하여 李 등(1995)에서와 같이 魚群의 遊泳特性을 조사하였으며, Sannomiya and Matuda(1987)에 의해 提案된 魚群行動의 數值 모델을 기초로 하여 부분적으로 修正·補完하여 前報에서와 같이 魚群行動을 나타내는 3차원 數值 모델을 작성하고, 그 모델의 파라미터를 最小自乘法으로 추정 한 바 있다. 그러나, 魚群行動

* 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.

을 나타내는 數值 모델의 파라미터를 推定할 수 있다 하더라도 그 모델이 魚群의 遊泳行動에 관한 現象을 잘 나타내지 못한다면 魚群行動을 나타내는 모델로서의 適合성이 없다.

시스템의 構造가 비교적 잘 파악되어 있는 制御系인 경우에는 시스템의 次數를 결정하여 파라미터를 同定함으로써 統計인 檢定方法에 의해 모델의 適合성을 檢定할 정도로 시스템의 모델링 技法이 발전되어 있으나, 生態 시스템의 경우에는 일반적인 統計의 檢定方法을 만족할 정도로 모델의 構造나 파라미터의 決定方法이 발전되어 있지 않다(三宮 등 ; 1986).

따라서, 이 研究에서는 前報에서 魚群의 遊泳空間을 3차원으로 고려하여 提案한 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 妥當성을 檢討하기 위하여 San-nomiya and Matuda(1987), 梁 등(1992 ; 1994) 및 Matuda *et al.*(1993) 등에서와 같이 數值 모델의 殘差에 대한 白色性檢定 및 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 比較하는 두 가지 방법을 사용하였다.

數值 모델의 妥當性 檢定方法

魚群의 遊泳空間을 3차원으로 고려하여 提案한 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 妥當성을 檢討하기 위하여 모델의 式에 의해 推定된 殘差의 白色性檢定(whiteness test) 및 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 比較하는 두 가지 방법을 사용하였다.

1. 殘差의 白色性檢定

前報에서 提案한 魚群行動을 나타내는 數值 모델과 같이 線形結合된 式 (43)에서 실제 觀測值로부터 구한 y_n 과 모델의 式에 의한 推定值 $\Omega_n^T \hat{\theta}^*$ 와의 差를 殘差 e_n 이라 하면, 殘差 e_n 은 다음 式으로 나타낼 수 있다. 단, $\hat{\theta}^*$ 는 모델의 파라미터의 收斂值이다.

$$e_n = y_n - \Omega_n^T \hat{\theta}^* \quad (1)$$

여기서, e_n 은 $3 \times N_f$ 차원의 벡터이다(N_f 는 個體數).

數值 모델의 파라미터에 대한 同定이 적절하다

고 하면 殘差는 白色雜音(white noise)의 형태로 나타난다고 할 수 있다. 따라서, 殘差의 白色성은 殘差에 대한 自己相關函數를 계산하여 檢定함으로써 數值 모델의 妥當성을 檢定할 수 있다.

殘差 e_n 의 自己相關函數 $\phi(l)$ 은

$$\hat{\phi}(l) = \frac{1}{M-l} \sum_{n=1}^{M-l} e_n e_{n+l} \quad ; l = 1, 2, \dots, L \quad (2)$$

으로 추정할 수 있다(相良 등 ; 1981). 여기서, 觀測回數 M 은 $M = 3N_f \times N$ 이며, 自己相關函數의 个数 L (lag)은 $L < \frac{M}{4}$ 인 범위에서 적당한 값을 선정하면 된다(Chatfield ; 1980). 단, $N = 599$ 이고, $L = 50$ 으로 하였다.

白色雜音에 대한 標本自己相關函數의 分散은 M 이 클 때에는 $\hat{\phi}^2(0)/M$ 이므로, 正規化시킨 自己相關函數를

$$\hat{\rho}(l) \triangleq \hat{\phi}(l)/\hat{\phi}(0) \quad ; l = 1, 2, \dots, L \quad (3)$$

이라 하면, $\hat{\rho}(l)$ 의 分散은 $\frac{1}{M}$ 이고 e_n 이 正規分布를 하기 때문에 $\hat{\rho}(l) ; l = 1, 2, \dots, L$ 을 계산하여 이들의 값 중에서 95%의 信賴區間 $[-1.96/\sqrt{M}, 1.96/\sqrt{M}]$ 의 범위에 들어가는 비율을 조사하면 殘差의 白色성을 檢定할 수 있다. 즉, 信賴區間에서 벗어난 自己相關函數의 个数 L_a 를 알 수 있으므로, $\frac{L_a}{L} < 0.05$ 일 때 統計적으로 有意하다고 할 수 있다.

2. 시뮬레이션

魚群行動을 나타내는 數值 모델에 대한 시뮬레이션을 위해서는 觀測結果에 의해 알 수 있는 파라미터인 $m, v, \alpha, \delta, d^+, d'^-, d^-, d'^-$ 및 파라미터의 同定結果에 의해 추정된 收斂值 $\alpha_i^*, k_{bi}^*, k_{ci}^*, k_{wi}^+, k_{wi}^-, p_i(k_{pci}^*, k_{pei}^* \text{ 및 } k_{pui}^*)$ 를 前報에서의 式 (26)에 대입한다. 또한, 前報에서의 式 (43)에 있는 確率變數 ξ_n 은 平均值가 0이고 分散이 數值 모델에 의한 殘差 e_n 과 동일한 값을 갖는 正規亂數를 취하고, 初期狀態 $x_i(0)$ 에는 적당한 亂數를 주어 시뮬레이션을 실시하면 각 時刻에 있어서 각 個體의 位置座標 $x_i(n+2), x_i(n+1), x_i(n) \quad (n = 1, 2, \dots ; i = 1, 2, \dots, N_f)$ 을 추정할 수 있으므로, 시뮬레이션에 의한 각 個體의 推定位置의 時系列 데이터를 구

할 수 있다.

따라서, 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과에 대하여 遊泳特性을 나타내는 몇 가지 指標를 비교하여 시뮬레이션에 의한 결과가 실제 魚群行動의 特性을 잘 반영하였다면 그 모델이 타당한 것으로 판단할 수 있다.

數值 모델의 妥當性 檢討

1. 殘差의 白色性檢定에 의한 檢討

模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 前報에서 提案한 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 殘差에 대한 白色性檢定을 각각 실시한 結果는 Table 1 및 Table 2에 나타내었다. 여기서, \bar{e} 는 殘差의 平均을, $\hat{\sigma}_e$ 는 殘差의 標準偏差를 나타낸다.

Table 1 및 Table 2에 나타낸 바와 같이 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 殘差의 平均은 0에 가까우며, 그 標準偏差는 대체로 ± 7 이내로서 殘差의 舉動이 대체로 안정된 것으로 나타났다. 또한, 個體數가 5마리 이상이고 流速

이 20cm/sec 이내인 경우에는 殘差의 전체 自己 相關函數의 갯수($L=50$)에 대한 95% 信賴區間을 벗어난 自己相關函數의 갯수(L_a)의 비율이 모두 0.05 미만이었으므로, 魚群의 遊泳空間을 3차원으로 고려하여 提案한 數值 모델의 殘差는 거의 白色 雜音의 樣相으로 나타나는 것으로 볼 수 있다. 따라서, 個體數가 적거나 流速이 빠른 경우에는 95%의 有意水準에서 統計적으로 有意하다고 할 수 없으나, 대체로 個體數가 5마리 이상이고 流速이 20cm/sec 이하인 경우에는 이 數值 모델이 타당한 것으로 간주할 수 있다.

한편, 數值 모델의 殘差에 대하여 白色性檢定을 실시한 한 例로서, 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 個體數가 10마리이고 流速이 10cm/sec일 때의 數值 모델에 대한 殘差 e_n 의 舉動과 그 頻度分布 및 自己相關函數 $\hat{\rho}(l)$ 를 각각 Fig. 1 및 Fig. 2에 나타내었다. 여기서, Fig. 1(a) 및 Fig. 2(a)는 殘差의 舉動을 나타내며, Fig. 1(b) 및 Fig. 2(b)에서와 같이 殘差는 대체로 正規 分布를 하는 것을 알 수 있다. Fig. 1(c) 및 Fig. 2(c)에서의 點線은 95% 信賴區間을 나타내며, 信賴區

Table 1. Whiteness test on the residual of the numerical model by the experiment in the water tank without model net($N=599, L=50$)

No. of fish	Item	Flow speed(cm/sec)					
		0	5	10	15	20	25
1	\bar{e}	0.0613					
	$\hat{\sigma}_e$	6.521	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.06					
2	\bar{e}	-0.0134					
	$\hat{\sigma}_e$	5.176	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.08					
3	\bar{e}	-0.0347					
	$\hat{\sigma}_e$	5.694	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.08					
5	\bar{e}	-0.0186					
	$\hat{\sigma}_e$	4.673	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.06					
7	\bar{e}	-0.0017					
	$\hat{\sigma}_e$	5.194	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.04					
10	\bar{e}	0.0718	-0.0016	0.0529	-0.0610	-0.0622	-0.0652
	$\hat{\sigma}_e$	5.260	3.458	2.940	4.731	4.920	4.853
	L_a/L	0.04	0.04	0.04	0.04	0.08	0.06

Table 2. Whiteness test on the residual of the numerical model by the experiment in the water tank with model net(N=599, L=50)

No. of fish	Item	Flow speed(cm/sec)					
		0	5	10	15	20	25
1	\bar{e}	-0.8630					
	$\hat{\sigma}_e$	3.754	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.06					
2	\bar{e}	0.0010					
	$\hat{\sigma}_e$	4.794	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.08					
3	\bar{e}	0.0237					
	$\hat{\sigma}_e$	4.681	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.10					
5	\bar{e}	0.0099					
	$\hat{\sigma}_e$	3.738	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.04					
7	\bar{e}	0.023					
	$\hat{\sigma}_e$	4.683	-	-	-	-	-
	L_a/L	0.04					
10	\bar{e}	0.0330	0.0331	-0.0579	-0.1855	-0.3722	-0.5344
	$\hat{\sigma}_e$	4.721	3.814	4.392	4.392	5.209	6.136
	L_a/L	0.04	0.04	0.04	0.04	0.02	0.02

間을 벗어난 自己相關函數의 갯수 L_a 는 2개인 것으로 나타났다.

2. 實驗과 시뮬레이션의 比較

이 研究에서는 魚群의 遊泳軌跡, 水槽 벽과 個體 사이의 最短距離, 遊泳速度, 遊泳 깊이 및 個體 相互間의 最近接距離 등의 遊泳特性을 나타내는 指標에 대하여 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교함으로써 數值 모델의 妥當性を 檢査하였다.

模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 각각 個體數가 10마리이고, 流速이 10cm/sec일 때의 遊泳特性을 나타내는 각 指標에 대하여 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교한 것은 Fig. 3~Fig. 10에 나타난 바와 같다. 여기서, 각 그림의 頻度分布圖에서의 曲線은 正規分布의 理論曲線을 나타낸다.

(1) 遊泳軌跡 및 水槽 벽과 個體 사이의 距離

Fig. 3 및 Fig. 4는 각각 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 個體의 遊泳軌跡(좌측 그림) 및 水槽 벽과 個體 사이의 平均距離의 頻度分布(우측 그림)에 대하여 實驗과 시뮬레

이션에 의한 결과를 비교한 것이다.

實驗과 시뮬레이션에 의한 遊泳軌跡을 비교하면 시뮬레이션에 의한 결과는 實驗에 의한 觀測值에 비해 다소 曲線的인 움직임을 나타내고 있으나, 三宮 등(1986), 梁 등(1992; 1994), 高木 등(1993) 및 Matuda *et al.*(1993)의 靜水狀態에서의 魚群行動을 나타내는 2차원 數值 모델에 의한 결과에서와 같이 水槽內에서의 遊泳 패턴을 잘 나타내고 있는 것으로 생각된다. 또한, 水槽 벽과 個體 사이의 平均距離의 頻度分布도 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과가 일치하지는 않으나 類似성을 나타내었다.

(2) 遊泳速度

Fig. 5 및 Fig. 6은 각각 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 각 個體의 平均 遊泳速度의 變化(좌측 그림)와 그 頻度分布(우측 그림)에 대하여 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교한 것이다.

平均 遊泳速度는 시뮬레이션에 의한 결과에 비해 實驗에 의한 觀測值의 變化 폭이 컸으나, 平均 遊泳速度의 頻度分布를 살펴보면 實驗과 시뮬레

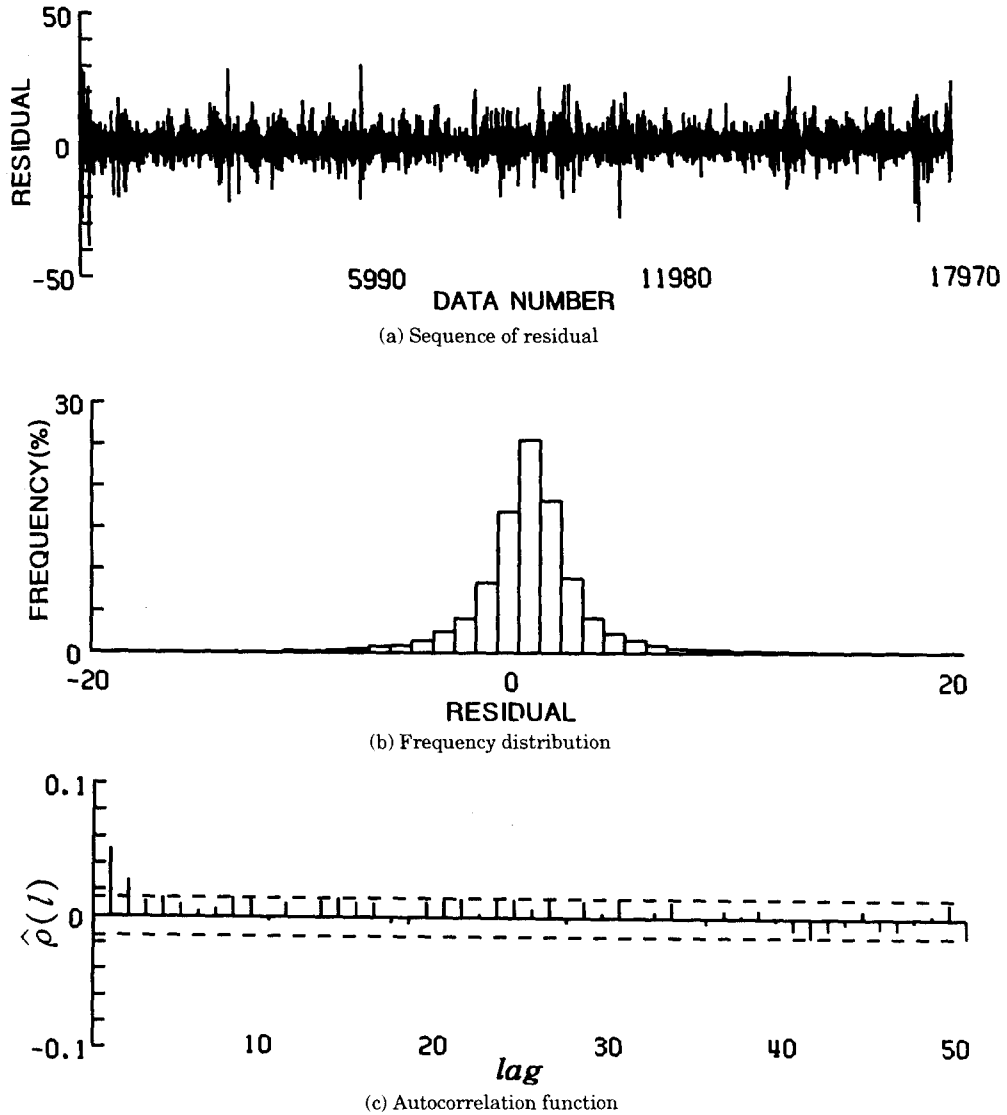


Fig. 1. Stochastic property of the residual by the experiment in the water tank without model net at the flow speed 10cm/sec. Dotted lines show the 95% confidence limit.

이선에 의한 결과는 대체로 類似性을 나타내었다.

(3) 遊泳 깊이

Fig. 7 및 Fig. 8은 각각 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 각 個體의 平均 遊泳 깊이의 변화(좌측 그림)와 그 頻度分布(우측 그림)에 대하여 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교한 것이다.

模型 그물이 없는 경우의 平均 遊泳 깊이의 변화 및 그 頻度分布는 實驗에 의한 觀測值에 비해 시뮬

레이션에 의한 결과의 변화 폭이 컸으나 대체로 類似性을 나타내었다. 한편, 模型 그물이 있는 경우의 시뮬레이션에 의한 결과는 平均 遊泳 깊이가 30~42cm의 범위에서 완만하게 변화하는 樣相을 나타내며, 그 頻度分布는 正規分布를 하여 實驗에 의한 觀測值와는 차이가 있었다. 이것은 模型 그물을 설치함으로써 模型 그물이 없는 경우에 비해 遊泳空間이 좁기 때문에 垂直移動의 변화가 크며, 시뮬레이션을 위하여 確率變數 ξ_t 에 正規亂數를 취

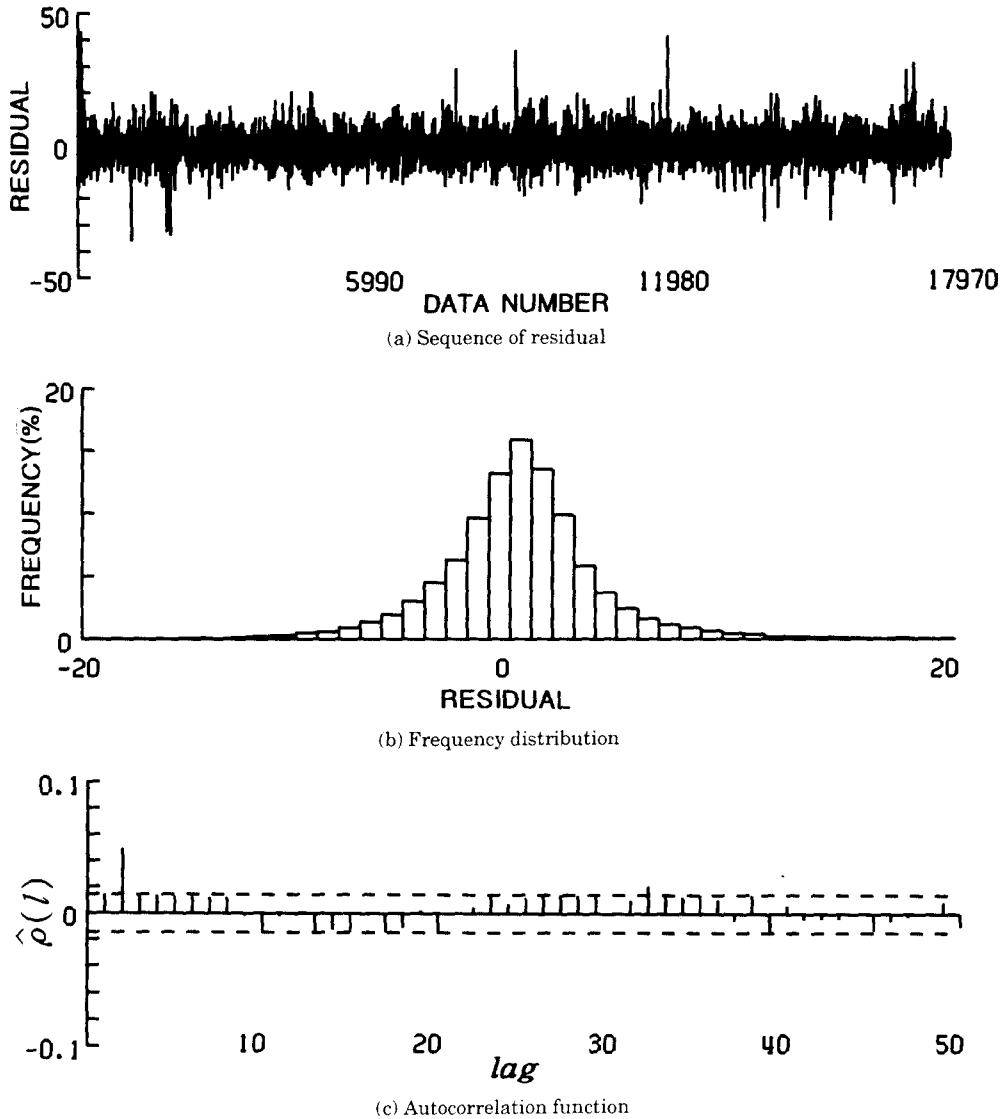


Fig. 2. Stochastic property of the residual by the experiment in the water tank with model net at the flow speed 10cm/sec. Dotted lines show the 95% confidence limit.

함으로서 遊泳 깊이의 頻度分布은 正規分布에 가깝게 나타난 것으로 생각된다.

(4) 個體 相互間의 最近接距離

Fig. 9 및 Fig. 10은 각각 模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우에 있어서 각 個體 相互間의 平均 最近接距離의 變化(좌측 그림)와 그 頻度分布(우측 그림)에 대하여 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 비교한 것이다.

個體 相互間의 平均 最近接距離는 實驗에 의한

觀測值가 시뮬레이션에 의한 결과에 비해 변화 폭이 다소 컸으나, 平均 最近接距離의 頻度分布을 살펴보면 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과는 대체로 類似性을 나타내었다.

이상의 結果에서 實驗과 시뮬레이션에 의한 結果가 완전히 일치하지는 않으나 대체로 그 傾向이 유사한 것으로 나타났으므로, 前報에서 魚群의 遊泳空間을 3차원으로 고려하여 提案한 數值 모델은 斷定的으로 판단하기는 곤란하나 妥當性이 있는

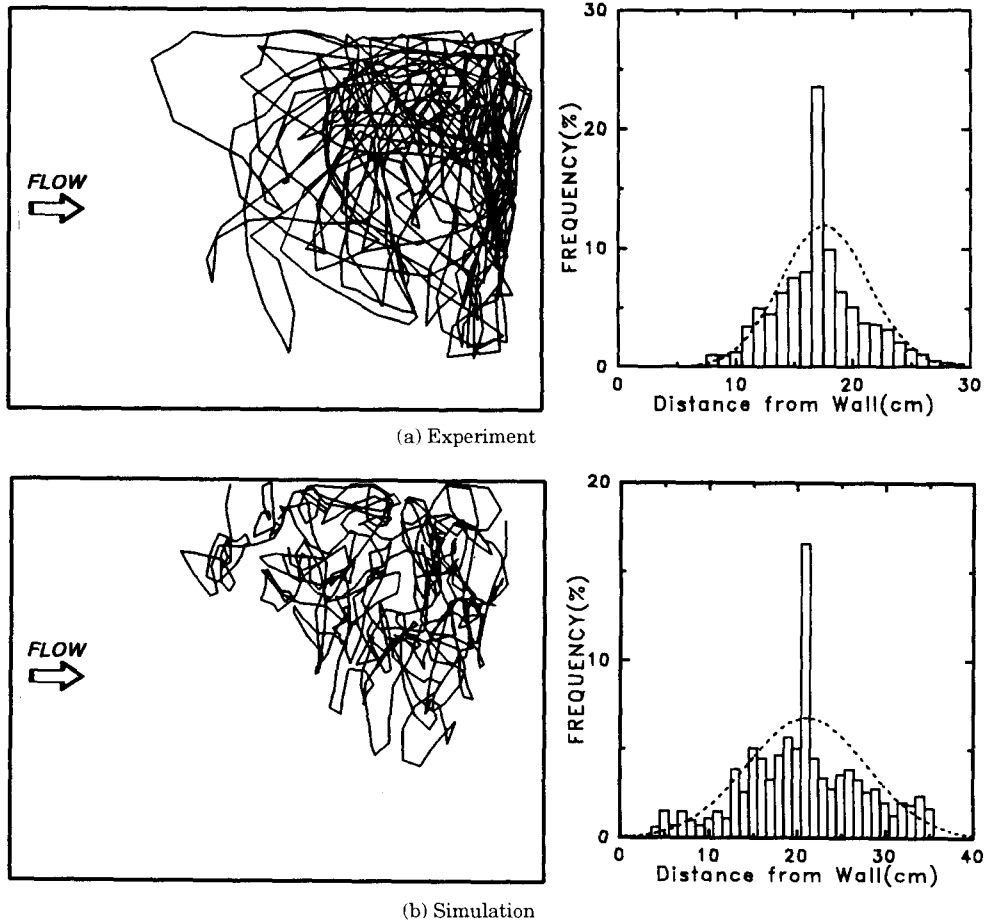


Fig. 3. Comparisons between experiment and simulation in the water tank without model net on the fish trajectory and the mean distance of individual from wall at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.

것으로 생각할 수 있다.

結 言

이 研究에서는 前報에서 魚群의 遊泳空間을 3차원으로 고려하여 提案한 魚群行動을 나타내는 數值 모델의 妥當性を 檢討하기 위하여 數值 모델의 殘差에 대한 白色性檢定 및 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과를 比較하는 두 가지 방법을 사용하였다.

模型 그물이 없는 경우와 模型 그물이 있는 경우 모두 殘差의 平均이 0에 가까우며, 그 標準偏差는 대체로 ± 7 이내로서 殘差의 舉動이 안정된 것으로 나타났다. 또한, 個體數가 5마리 이상이고 流速

이 20cm/sec 이하인 경우에는 數值 모델에 의한 殘差의 自己相關函數가 95%의 有意水準에서 有意한 것으로 나타났으므로, 殘差는 白色雜音의 樣相으로 나타나는 것으로 볼 수 있으며, 이 數值 모델은 대체로 타당한 것으로 간주할 수 있다.

實驗과 시뮬레이션에 의한 결과에 대하여 魚群의 遊泳特性을 나타내는 指標로서 遊泳軌跡, 水槽벽과 個體 사이의 距離, 遊泳速度, 遊泳 깊이, 個體相互間의 最近接距離 등을 比較하면, 實驗과 시뮬레이션에 의한 결과가 완전히 일치하지는 않으나 대체로 그 傾向이 유사한 것으로 나타났다.

이상의 결과에서 魚群의 遊泳空間을 3차원으로 고려하여 流速의 변화에 따른 魚群行動의 推定이

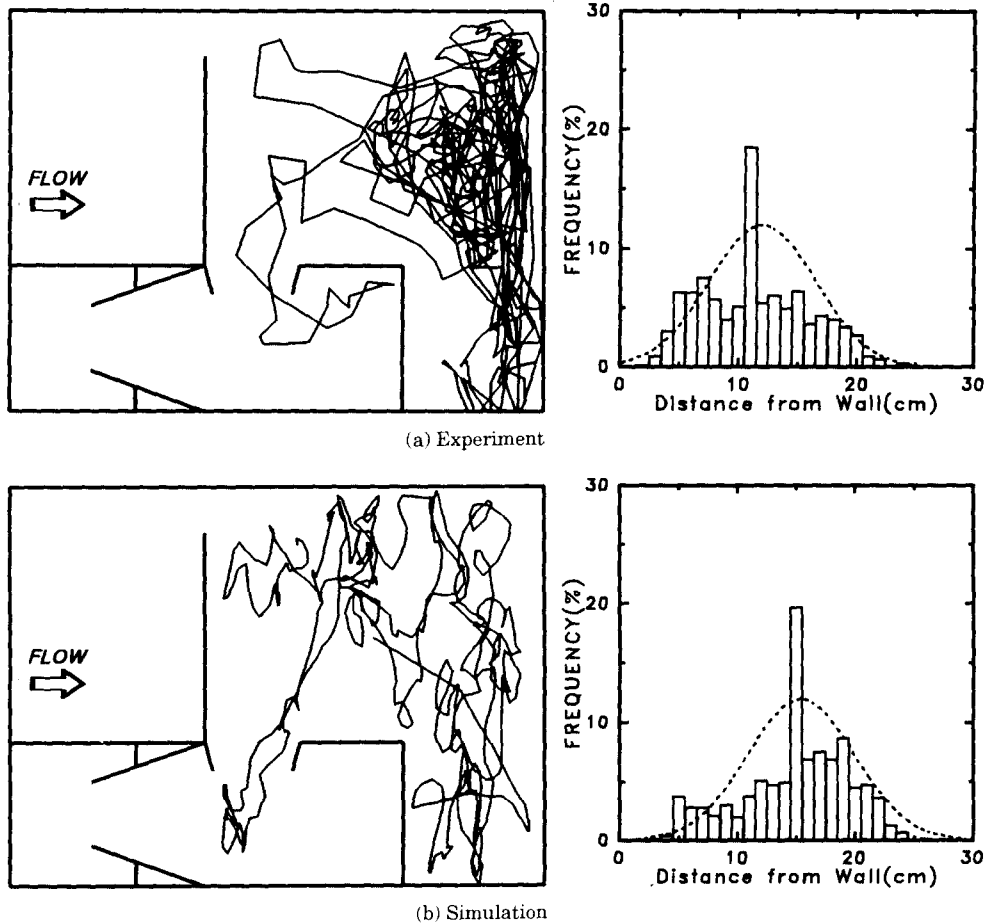


Fig. 4. Comparisons between experiment and simulation in the water tank with model net on the fish trajectory and the mean distance of individual from wall at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.

어는 정도 가능해짐으로서, 앞으로 보다 발전된 모델링 기술을 도입하면 현장에서의適用可能性이 있을 것으로 생각된다. 그러나, 이러한 일련의 연구에서는 實驗의 편의를 위하여 時間의 변화에 따른 流向과 流速의 변화를 고려하지 않고 일정 方向의 일정 流速만을 고려하였기 때문에, 현장에서의 적용을 위해서는 環境要因, 空間上의 境界條件 및 魚群의 規模에 의한 차이 등 해결해야 할 問題點이 많이 남아 있다. 現段階에서의 課題는 蓄養場과 같은 제한된 空間에서의 魚群行動의 豫測, 制御 등이 가능하도록 모델링에 관한 研究가 계속되어야 할 것이다.

參考文獻

- Chatfield, C.(1980) : The Analysis of Time Series, An Introduction(2nd Ed.). Chapman and Hall, New York, pp. 25.
- 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.
- 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

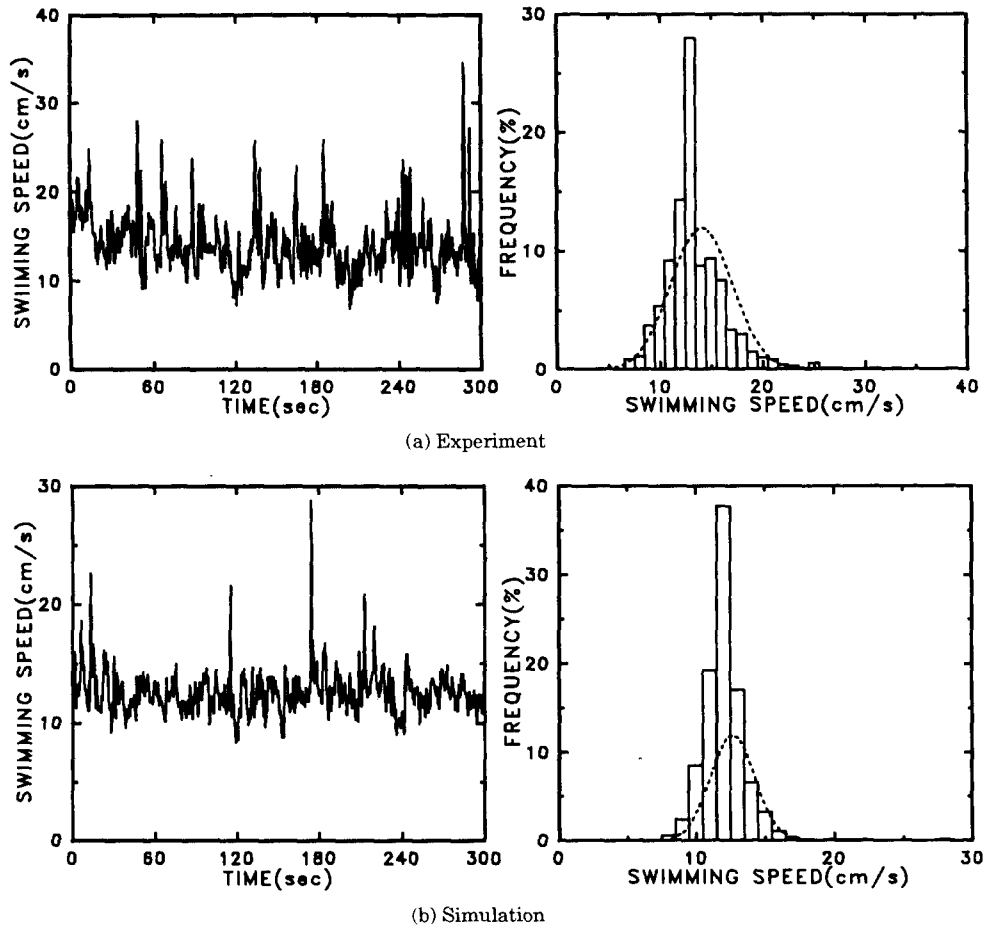
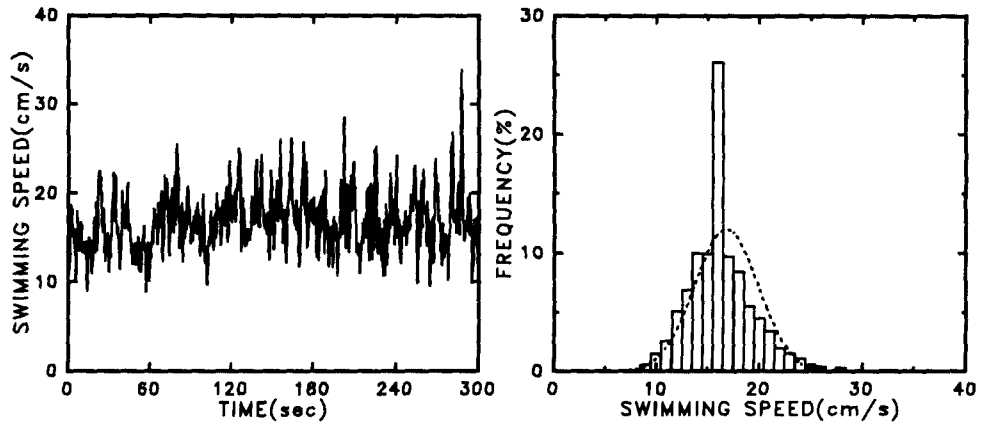


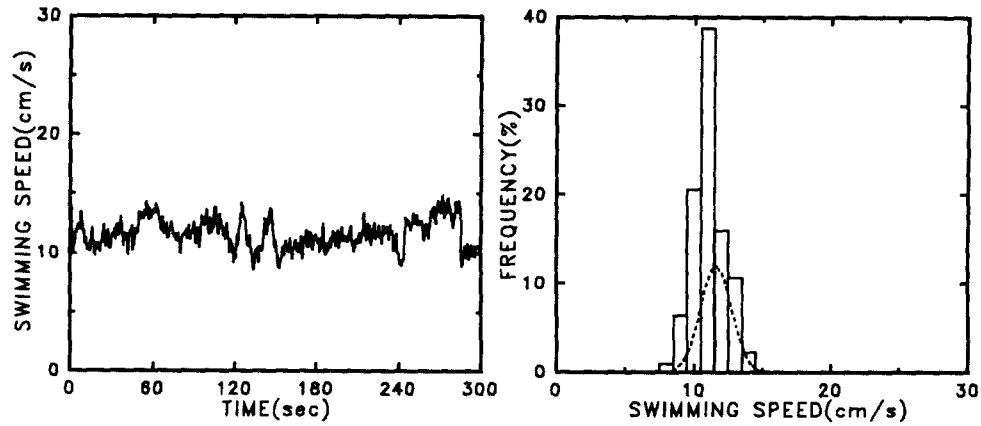
Fig. 5. Comparisons between experiment and simulation in the water tank without model net on the mean swimming speed at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.

いて. *Nippon Suisan Gakkaishi* 59(8), 1279 - 1287.
 三宮信夫・メハディヌシラジ・石崎一成(1986): 水槽
 實驗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.
 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): ウグイの水槽實驗
 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*
 60(2), 185 - 191.
 李秉錡・李昊在・張鎬榮・金錫載(1995): 模型 그물에
 대한 魚群行動의 數値 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.

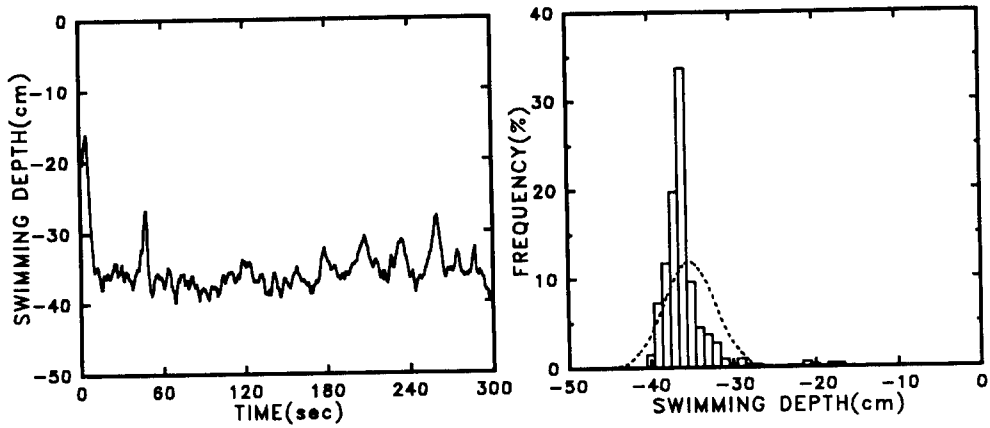


(a) Experiment

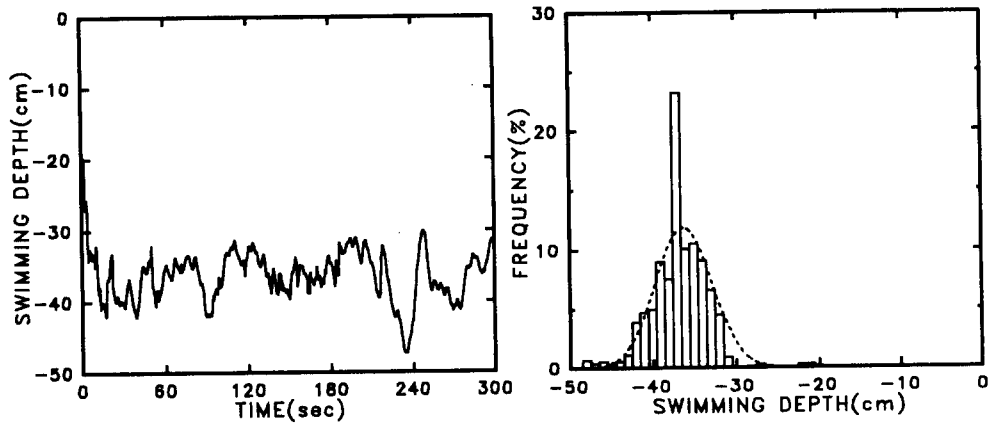


(b) Simulation

Fig. 6. Comparisons between experiment and simulation in the water tank with model net on the mean swimming speed at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.

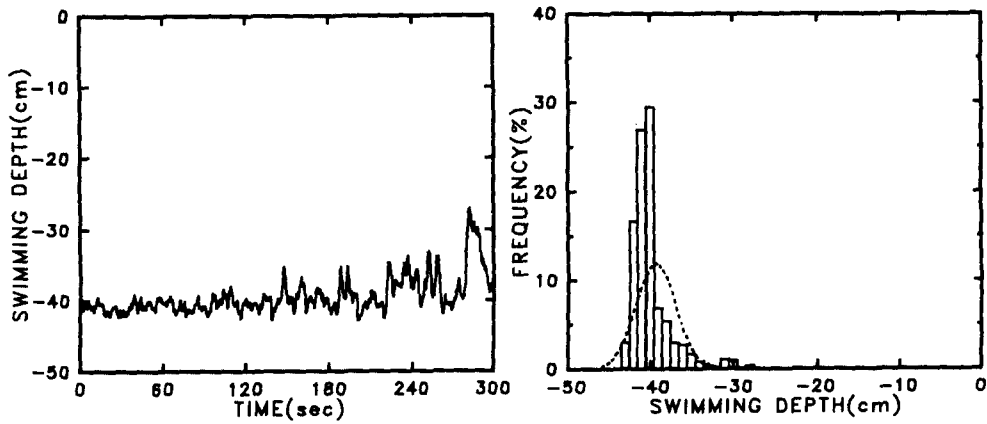


(a) Experiment

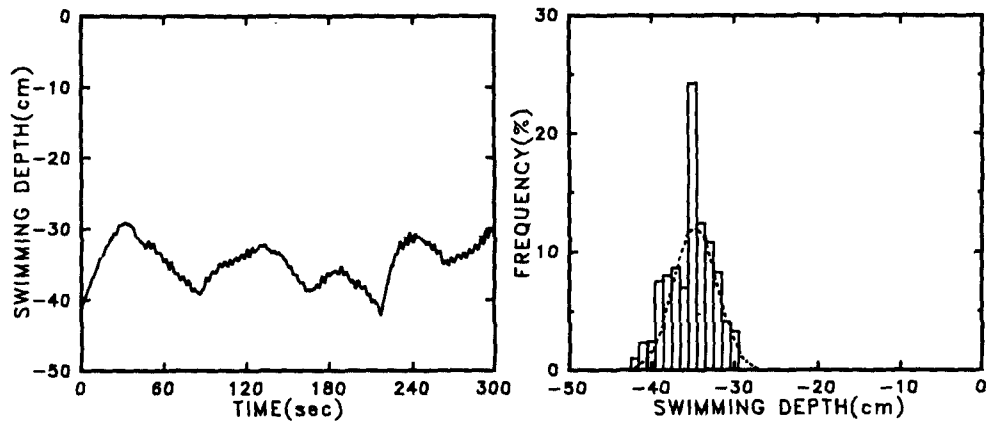


(b) Simulation

Fig. 7. Comparisons between experiment and simulation in the water tank without model net on the mean swimming depth at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.

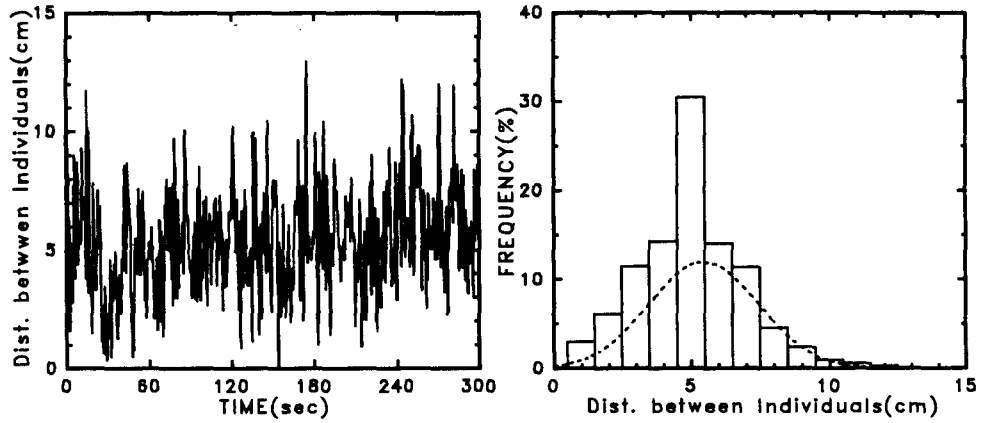


(a) Experiment

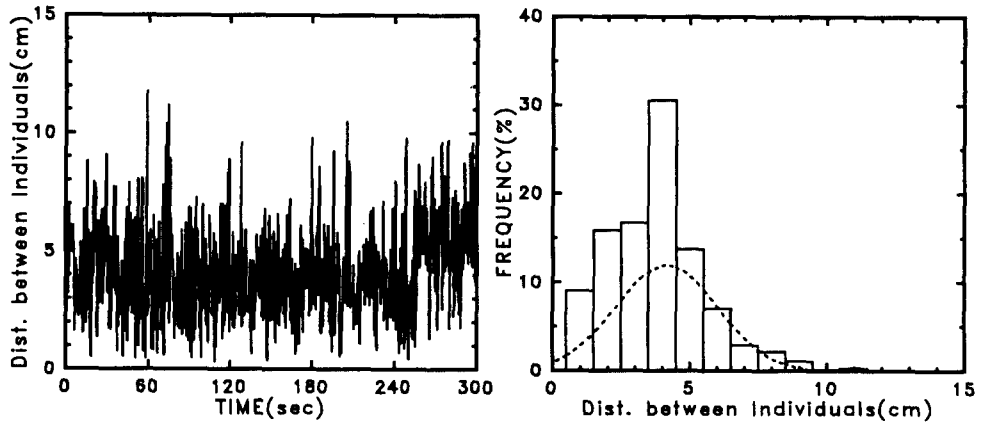


(b) Simulation

Fig. 8. Comparisons between experiment and simulation in the water tank with model net on the mean swimming depth at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.

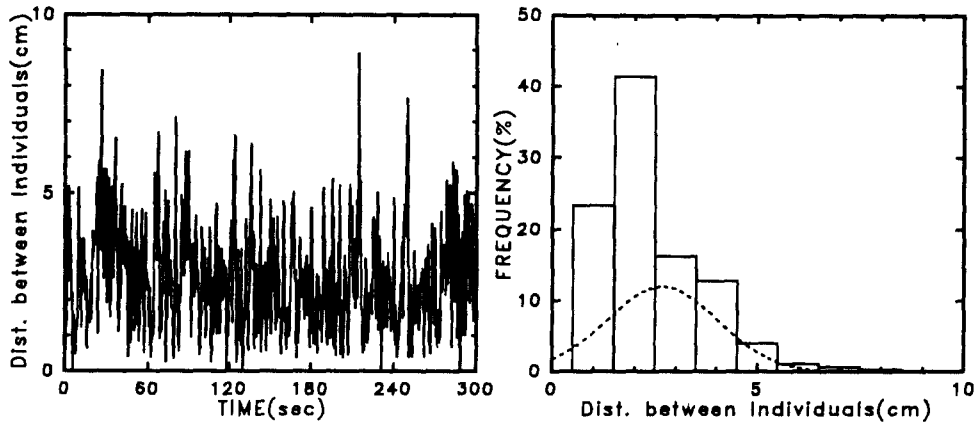


(a) Experiment

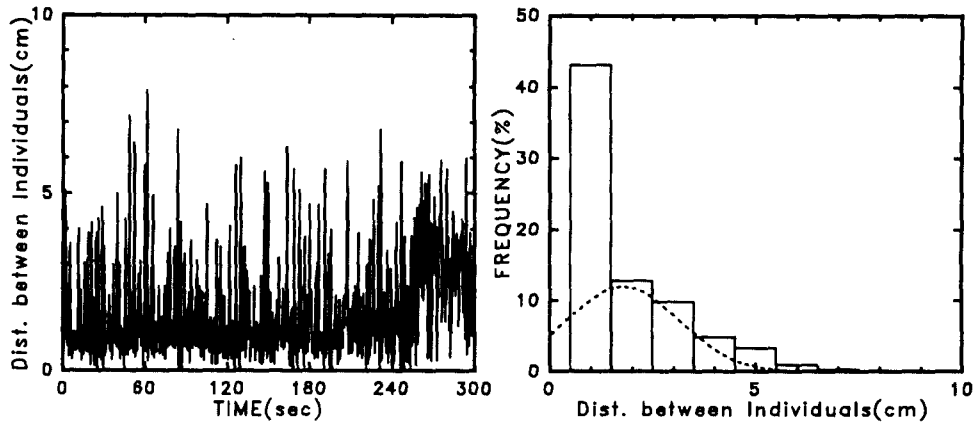


(b) Simulation

Fig. 9. Comparisons between experment and simulation in the water tank without model net on the the mean distance between the nearest individuals at the flow speed 10cm/sec . Dotted line shows the curve of normal distribution.



(a) Experiment



(b) Simulation

Fig. 10. Comparisons between experiment and simulation in the water tank with model net on the the mean distance between the nearest individuals at the flow speed 10cm/sec. Dotted line shows the curve of normal distribution.