

# 模型 그물에 대한 魚群行動의 數值 모델링에 관한 研究\*

- 模型 그물이 없는 水槽에서의 무지개송어의 遊泳特性 -

李秉鎬 · 李昊在 · 張鎬榮\*\* · 金錫載\*\*\*

釜山水產大學校, 群山大學校\*\*, 韓國海技研修院\*\*\*

(1994년 11월 24일 접수)

## A study on the Numerical Modeling of the Fish Behavior to the Model Net

- Swimming Characteristics of Rainbow Trout, *Salmo gairdnerii*  
in the Water Tank without Model Net -

Byoung - Gee LEE, Dae - Jae LEE, Ho - Young CHANG\*\* and Suk - Jae KIM\*\*\*

National Fisheries University of Pusan,

Kunsan National University\*\*,

Korea Marine Training and Research Institute\*\*\*

(Received November 24, 1994)

To estimate the parameters of a mathematical model of fishes' swimming behavior, the behavior in an experimental water tank was observed and analyzed using the video monitoring system. The tank was equipped with vertical circulation system, and measured 3,500L×1,500B×1,000H mm at flow channel and 1,200L×900B×500H mm at observational part.

Rainbow trout, *Salmo gairdnerii* were used as experimental fishes. Their swimming behavior in the tank was observed by the monitoring system, and the positions of every individual were checked at 0.5 second intervals by the image processing of recorded pictures for 5 minutes.

The mean swimming speed calculated from the time series data of positions of every individual ranged from 2.5BL cm/sec to 2.9BL cm/sec at the stagnated flow. The mean swimming speed of 10 individuals in a school increased according to the flow speed. The mean swimming depth ranged from 17 cm to 38 cm even though it changed irregularly at the stagnated flow and gradually became stable according to the increase of 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.

In the present study, the mean distance of individuals from wall of the tank varied from 17.6 *cm* to 21.4 *cm*. The mean distance between the nearest individuals varied from 0.4BL *cm* to 0.7BL *cm* when 10 individuals in a school were observed.

The mean dimension of fish schools became enlarged in all directions according to increase in the number of individuals, and as flow speed increased the horizontal dimension of fish schools expanded while their vertical dimension decreased.

## 序 言

최근 시스템 工學의 발전과 더불어 非工學的인 분야에서도 豫測, 制御 등을 위하여 시스템 工學的인 方法을 도입하고 있는 데, 水産學分野에도 현장에서의 觀測 및 實驗의 어려움 등으로 인하여 이러한 시스템의 모델링 技法을 도입할 필요성이 대두되고 있다.

魚群行動을 計測하기 위해서는 水中에서 일어나는 현상을 다루어야 하기 때문에 현장에서는 觀測 데이터를 취득하는 데 있어서 어려움이 많으나, 水槽實驗에 의해서는 장시간 동일한 조건에 의한 實驗 데이터를 취득할 수가 있다. 또한 魚群을 구성하는 각 個體를 質點으로 간주하고, 魚群行動을 運動法則에 의한 하나의 시스템으로 간주하여 魚群의 遊泳行動을 質點系의 運動方程式으로 기술하여 數值 모델로 나타낼 수 있다(三宮

등: 1990).

따라서, 이 研究에서는 「模型 그물에 대한 魚群行動의 數值 모델링에 관한 研究」의 일환으로서 魚群行動의 modeling을 위하여 魚群行動을 나타내는 運動方程式을 구성하는 각종 요소들의 parameter를 추정하기 위한 基礎資料를 제공하고자, 模型 그물을 설치하지 않은 상태에서의 流速 변화에 따른 實驗水槽에서의 무지개송어의 遊泳行動을 畫像處理하여 각 個體의 3차원 位置座標로부터 계산된 遊泳速度, 遊泳 깊이, 水槽의 벽과 個體 사이의 距離, 個體相互間的 最近接距離, 魚群의 3차원적 構造 등의 遊泳特性을 調査·分析하였다.

## 裝置 및 方法

實驗에 사용된 水槽는 Fig. 1과 같은 垂直 循環

Table 1. Details of fish size used in the experiment

Flow speed ( <i>cm/sec</i> )	No. of fish	Body weight ( <i>g</i> )	Body length ( <i>cm</i> )	Body height ( <i>cm</i> )	Body width ( <i>cm</i> )
0	1	10.0	9.0	1.81	1.01
	2	9.8	8.9	1.86	1.04
	3	8.3	8.4	1.74	0.94
	5	9.8	8.7	1.85	1.02
	7	8.1	8.1	1.76	0.97
	10	7.3	7.8	1.73	0.97
5	10	8.7	8.3	1.82	1.04
10	10	9.1	8.5	1.79	1.02
15	10	7.0	7.7	1.69	0.93
20	10	9.1	8.6	1.80	1.04
25	10	7.5	8.0	1.68	0.97

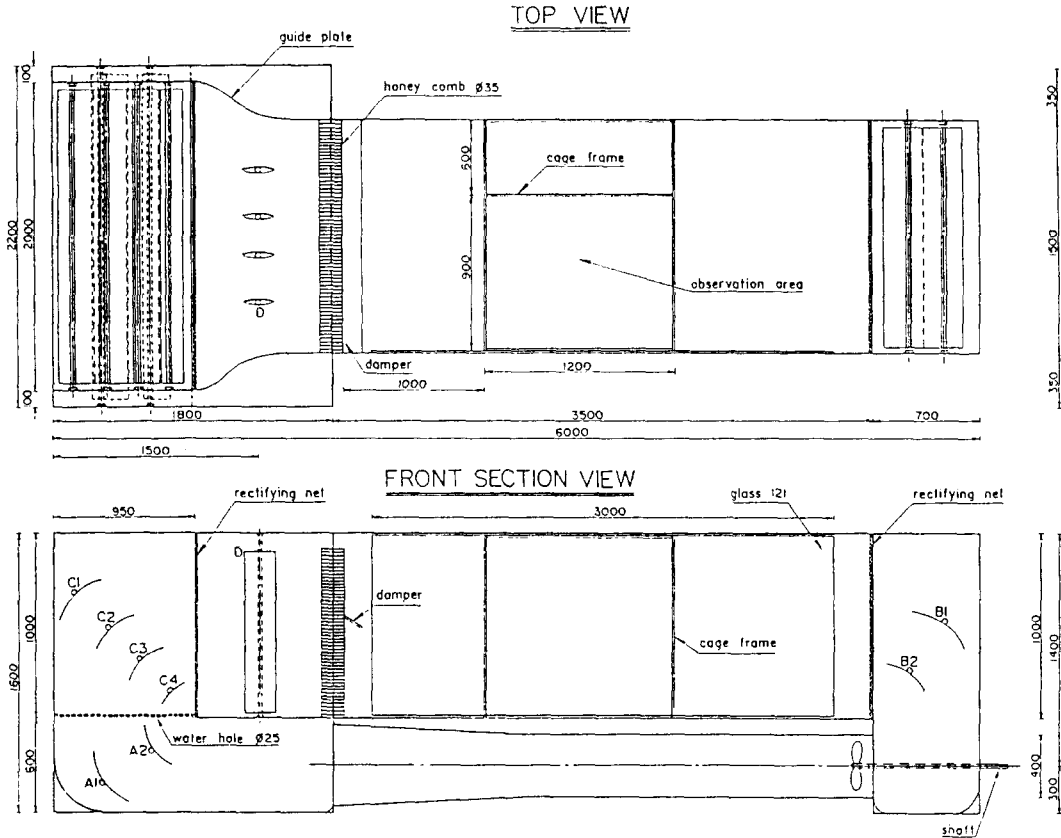


Fig. 1. Construction of the experimental water tank.

A1, A2, B1, B2: fixed horizontal vanes, C1~C4: variable horizontal vanes,  
D: variable vertical vanes.

型 回流水槽이며, 水槽內에 설치한 cage frame 에 網目이 5 mm인 스테인레스網을 붙여 水流에 영향을 미치지 않도록 하여 觀測空間(1,200L×900B)으로 사용하였으며, 實驗水槽의 觀測部에서의 水深은 50 cm로 유지하여 實驗魚가 水槽內에서 3차원 空間을 자유로이 游泳할 수 있도록 하였다. 照明은 水槽의 觀測部에 그림자가 생기지 않도록 觀測部 주위에 조명용 앵글을 세우고, 그 上部에 형광등(20W×4)을 설치하여 水槽의 觀測部를 간접적으로 비추도록 조정하였으며, 觀測部 水面上的 照度는 100 lux(CTIS, P-114)를 유지하도록 하였다. 또한 實驗時 水溫은 14~16.5℃ 였다.

實驗魚는 조치원에 있는 성포송어양식장에서 구입한 무지개송어 *Salmo gairdnerii*의 稚魚를 사용하였으며, 魚體의 크기는 Table 1과 같다.

實驗은 模型 그물을 설치하지 않았을 때와 설치하였을 때로 구분하여 각각 流速을 0, 5, 10, 15, 20 및 25 cm/sec로 변화시켜, 靜水狀態에서는 實驗魚를 1, 2, 3, 5, 7 및 10마리씩, 流速이 5~25 cm/sec일 때에는 각각 10마리씩 투입하여 3~5회씩 觀測하고, 實驗魚의 遊泳狀態가 가장 양호한 경우를 선정하여 魚群行動을 調査하였다. 여기서는 模型 그물을 설치하지 않은 경우만을 대상으로 하여 分析하였다.

魚群의 遊泳行動을 計測하기 위하여 Fig. 2와

같이 實驗室의 천정과 水槽 觀測部の 正面에 각각 설치한 2대의 비디오 카메라(SONY, TR-75)로 魚群의 遊泳行動을 촬영하고, 그 畫面에 撮影時刻이 표시되도록 하여 녹화하였다. 이 때, 천정에 설치한 비디오 카메라로부터 水槽 觀測部の 水面까지의 거리는 2.5 m였으며, 觀測部 正面에 설치한 비디오 카메라로부터 觀測窓까지의 거리는 2.3 m였다. 魚群行動의 촬영은 實驗魚를 觀測部에 투입한 후 魚群이 안정되게 游泳하기 시작하였을 때부터 하였으며, 撮影時間은 약 10분간으로 하였다. 별도의 비디오 테이프에 녹화된 畫像은 VTR (Samsung, SV-599A)로 재생하여 0.5초 간격으로 5분간의 映像을 image processor(Doin Elec., PC Vision & Grabber)를 이용하여 畫像情報(PCX file; Resolution 320×200)로 변환시켜 각각 컴퓨터(PC 486DX<sub>2</sub>)의 HDD(Capacity: 1 Giga Byte)에 저장하였다.

魚群의 位置情報는 저장된 畫像을 컴퓨터의 모니터에 出力시켜 水槽의 길이 방향을 X좌표, 폭 방향을 Y좌표, 깊이 방향을 Z좌표로 정하고, 천정에서 촬영한 畫像의 좌표를 X-Y평면의 2차원 좌

표, 觀測部の 正面에서 촬영한 畫像의 座標를 X-Z평면의 2차원 좌표로 구분하여 각 個體의 位置座標를 각각 mouse로 sampling하였다. 각 個體의 주둥이 끝을 그 個體의 位置座標로 설정하여 0.5초 간격으로 5분간(600점)씩 計測하여 각각의

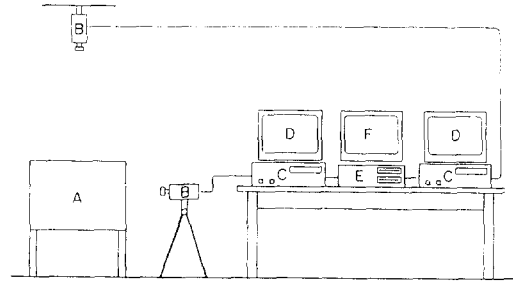


Fig. 2. Diagrammatic view of the experimental equipments.

- A: experimental water channel.
- B: video cameras.
- C: video tape recorders.
- D: TV sets.
- E: personal computer.
- F: monitor.

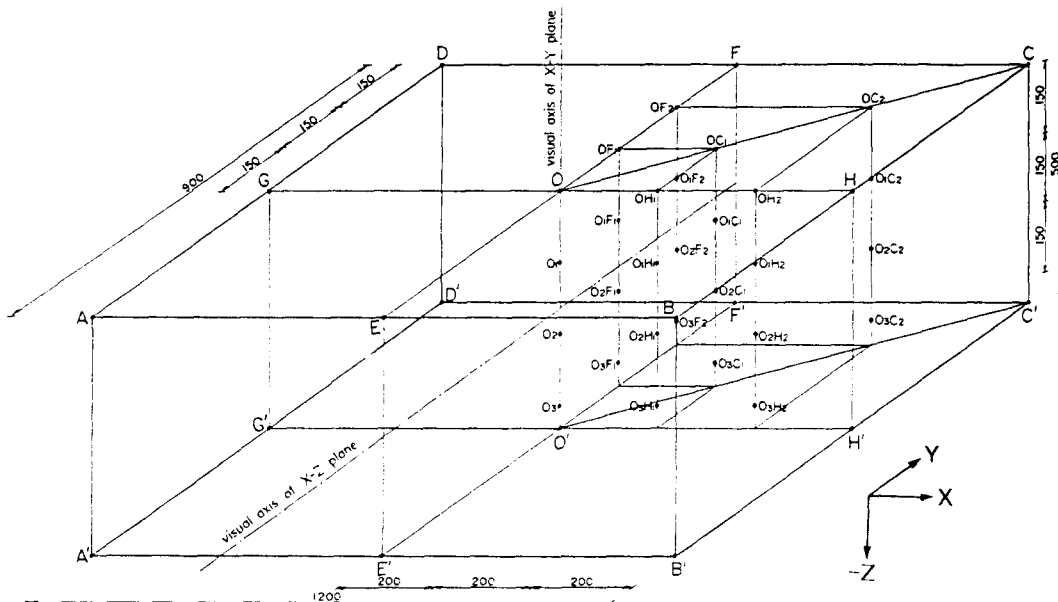


Fig. 3. Schematic diagram of established points for the positional correction at the observational part.

X-Y평면의 2차원 座標와 X-Z평면의 2차원 좌표를 합성하여 3차원 좌표로 재구성한 時系列 데이터를 구하였다. 이 때 구해진 時系列 데이터는 각 個體의 畫面上의 位置座標, 즉 畫素(pixel)의 位置座標이므로 물의 屈折率, 被寫體의 遠近, 被寫體의 視軸으로부터의 偏倚 등으로 인하여 각 個體의 실제 위치와 畫面上에 나타난 위치 사이에는 被寫體의 遠近, 視軸으로부터의 偏倚度에 따라 屈折誤差가 발생한다. 따라서, Fig. 3에 나타난 바와 같이 39개의 補正點을 선정하고, 既知의 각 補正點의 실제 位置座標와 畫面上에 나타난 畫素의 位置座標를 비교하므로써 각 補正點에서의 補正值를 구할 수 있으므로, 각 個體가 觀測部內의 임의의 위치에 있을 때 畫面上에 나타난 각 個體의 위치는 각 補正點에서의 補正值를 기초로 補間하여 실제 位置座標로 환산시켰다. 이렇게 구한 각 個體의 位置座標로부터 魚群의 遊泳速度, 遊泳 깊이, 水槽의 벽과 個體 사이의 距離, 個體相互間의 最近接距離, 魚群의 3차원적 構造 등을 계산하였다.

### 結果 및 考察

무지개송어의 遊泳行動을 畫像處理에 의해 측정 한 각 個體의 位置座標를 이용하여 魚群의 遊泳

軌跡을 구하고, 이러한 位置座標의 時系列 데이터로부터 流速의 변화에 따른 魚群의 平均 遊泳速度, 平均 遊泳 깊이, 水槽의 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.

무지개송어의 遊泳軌跡은 遊泳行動을 畫像處理하여 0.5초 간격으로 계측한 각 個體의 위치를 圖面上에 표시하고 각 점을 직선으로 연결하여 근사적으로 구하였으며, 流速別 遊泳軌跡의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 遊泳軌跡으로부터 무지개송어의 遊泳行動을 살펴보면, 靜水狀態에서는 Matuda *et al.* (1993)의 研究에서와 같이 水槽中央部에서의 遊泳頻度가 높게 나타났으며, 水槽 벽면으로부터 상당히 떨어져서 旋回運動을 하는 것이 관찰되었다. 流速이 있는 경우에는 流速이 빠를수록 走流性이 강하게 나타나 前進遊泳行動의 빈도가 높게 나타났으며, 流速이 느린 5~10 *cm/sec*에서는 定點遊泳行動과 後退遊泳行動의 빈도가 높게 나타나 水流의 下流域에서 머무는 경우가 많았다.

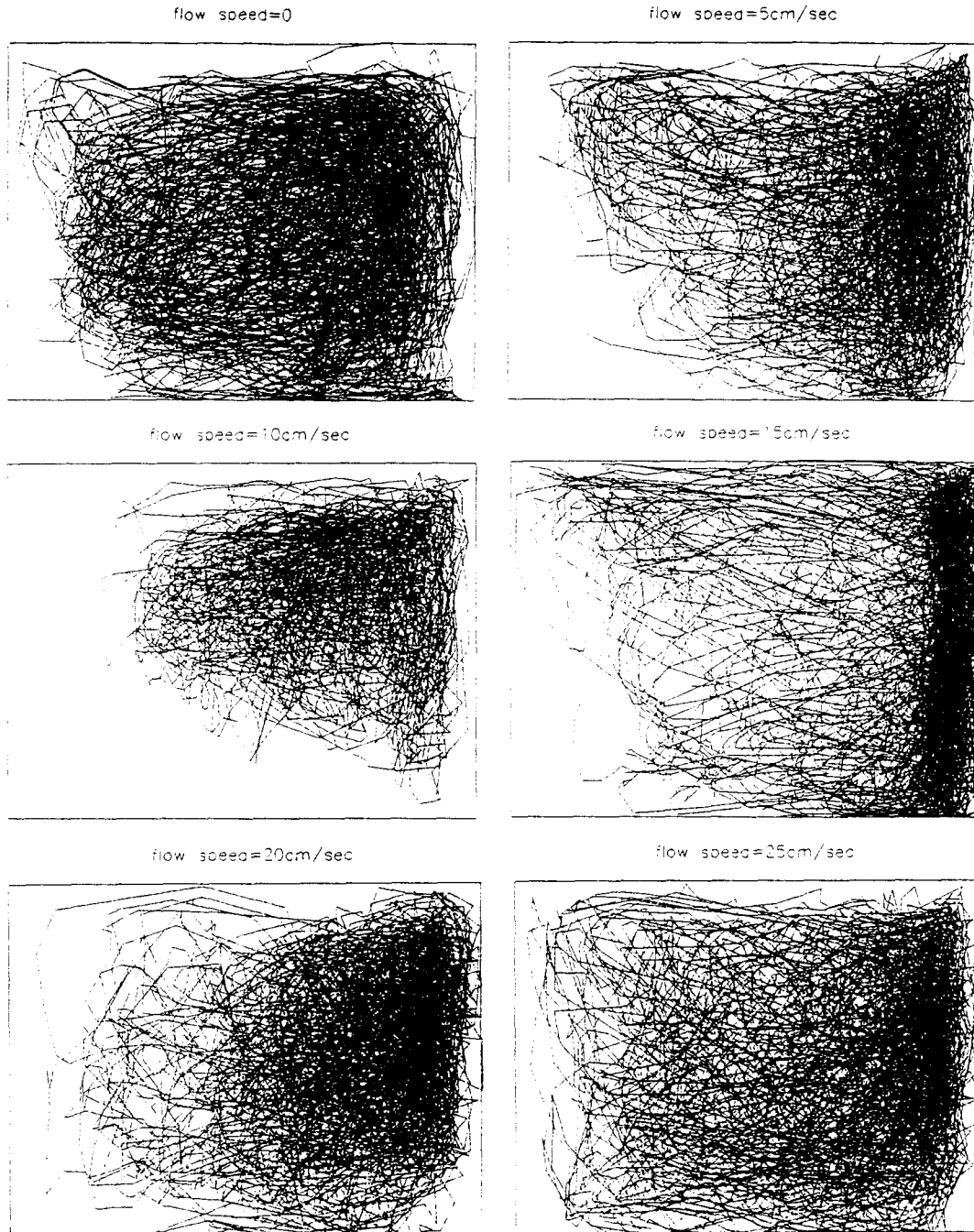
각 個體의 位置座標의 時系列 데이터로부터 魚群의 遊泳速度를 계산한 결과, 靜水狀態에서의 平均 遊泳速度는 21.6~23.6 *cm/sec* (2.5~2.9BL *cm/sec*)로서 個體數가 많을수록 體長當 遊泳速

**Table 2. Experimental results of swimming behavior according to the flow speed**

Flow speed ( <i>cm/sec</i> )	No. of fish	Swimming speed ( <i>cm/sec</i> )	Swimming depth ( <i>cm</i> )	Distance of individuals from wall of tank ( <i>cm</i> )	Nearest distance between individuals ( <i>cm</i> )
0	1	23.6(2.6BL)	-31.7	18.8	—
	2	22.2(2.5BL)	-30.4	18.2	27.7
	3	22.6(2.6BL)	-32.3	13.2	10.1
	5	21.6(2.6BL)	-26.4	14.2	9.5
	7	23.6(2.9BL)	-27.0	18.8	6.9
	10	22.7(2.9BL)	-27.5	17.6	3.0
5	10	15.4(1.9BL)	-16.6	19.9	5.9
10	10	14.1(1.7BL)	-35.2	17.6	5.5
15	10	22.8(3.0BL)	-29.1	21.4	5.6
20	10	25.9(3.0BL)	-38.5	18.9	3.3
25	10	30.6(3.8BL)	-38.4	18.9	5.2

도가 빨라지는 경향이 있기는 하나 큰 차이는 없었으며, Bainbridge(1958)의 研究에서와 같이

紡錘形 魚類의 巡泳速度인  $2\sim 3BL\text{ cm/sec}$ 와 일치하였다. Fig. 5에서와 같이 個體數가 10마리인



**Fig. 4.** Top viewed swimming trajectory according to the flow speed for 5 minutes( $N_f=10$ ).

경우의 流速의 변화에 따른 遊泳速度의 변화를 보면, 流速이 빠를수록 遊泳速度도 빨라져서 流速이 25 cm/sec인 경우에는 遊泳速度가 30.6 cm/sec (3.8BL cm/sec)에 달하였다. 流速이 5 cm/sec와 10 cm/sec일 때의 平均 遊泳速度는 각각 15.4 cm/sec (1.9BL cm/sec)와 14.1 cm/sec (1.7BL cm/sec)로서 靜水狀態에서의 遊泳速度보다 느려졌는데, 이 流速의 범위에서는 Fig. 6에 나타난 遊泳速度의 頻度分布에서와 같이 流速과 비슷한 遊泳速度인 10~15 cm/sec의 빈도가 높게 나타났으며, 水流를 따라 후퇴하거나 停滯하는 個體가 많았기 때문이다.

魚群의 垂直移動狀態를 알아보기 위해 조사한 魚群의 平均 遊泳 깊이는 個體數가 10마리인 경우에는 17~38 cm로서 주로 中層의 水深에서 游泳하였으며, 流速이 빠를수록 遊泳 깊이가 깊어지는 경향을 나타내었다. 또한, Fig. 7에서와 같이 靜水狀態에서는 遊泳 깊이의 변화가 매우 컸으나, 流速이 빠를수록 遊泳 깊이의 변화는 적었다.

水槽의 벽과 個體 사이의 距離는 각 個體의 位置 座標로부터 가장 인접한 壁面과의 距離로서 계산하였다. 個體數가 10마리인 경우에 있어서 水槽의 벽

과 個體 사이의 平均 距離는 17.6~21.4 cm였으며, 流速이 빠를수록 水槽의 벽과 個體 사이의 距離가 다소 멀어지는 경향을 나타내었다.

個體相互間의 平均 最近接距離는 個體數가 많

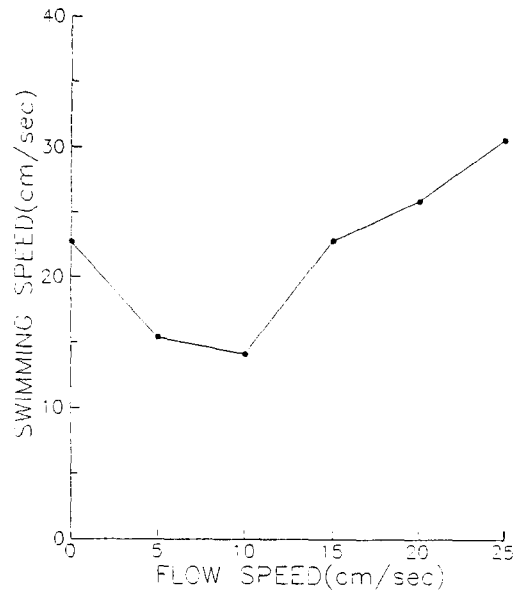


Fig. 5. Mean swimming speed of fishes according to the flow speed (N<sub>f</sub>=10).

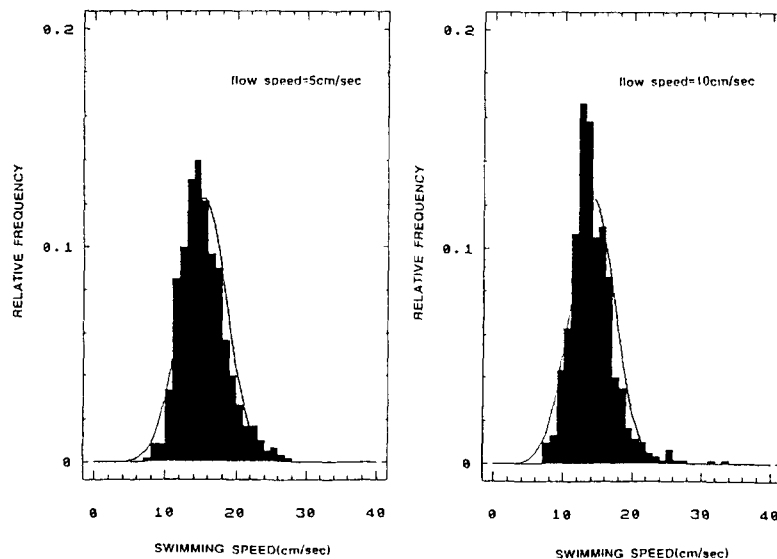


Fig. 6. Frequency distribution of the swimming speed (N<sub>f</sub>=10).

을수록 가까워지며, 個體數가 10마리인 경우에 있어서 流速의 변화에 따른 個體相互間的 最近接距離의 平均值는 3.0~5.9 cm(0.4~0.7BL cm)로 나타났다. 이것은 Pitcher(1973)의 研究에서 淡水魚인 연준모치에 대해 最近接距離를 조사한 4.9~6.9 cm(0.9BL cm)보다는 다소 작은 값이었으나, Cullen *et al.*(1965)과 長谷川 등(1981)의 研究에서 각각 海産魚인 pilchard와 돌돔의 最近接距離를 조사한 3~6 cm(0.4~0.8BL cm) 및 5.3

cm(0.6BL cm)와 비슷한 값을 나타내었다.

한편, 魚群의 3차원적인 構造를 살펴보면, Table 3에 나타난 바와 같이 群을 구성하는 個體數가 증가함에 따라 群의 形狀은 길이 방향(X축 방향), 폭 방향(Y축 방향) 및 깊이 방향(Z축 방향)의 모든 방향으로 넓어지며, 流速이 빨라질수록 길이 방향과 폭 방향의 크기가 증가하고 깊이 방향의 크기가 감소하는 경향을 나타내었다. 個體數가 10마리인 경우에 있어서 X, Y 및 Z축의 각

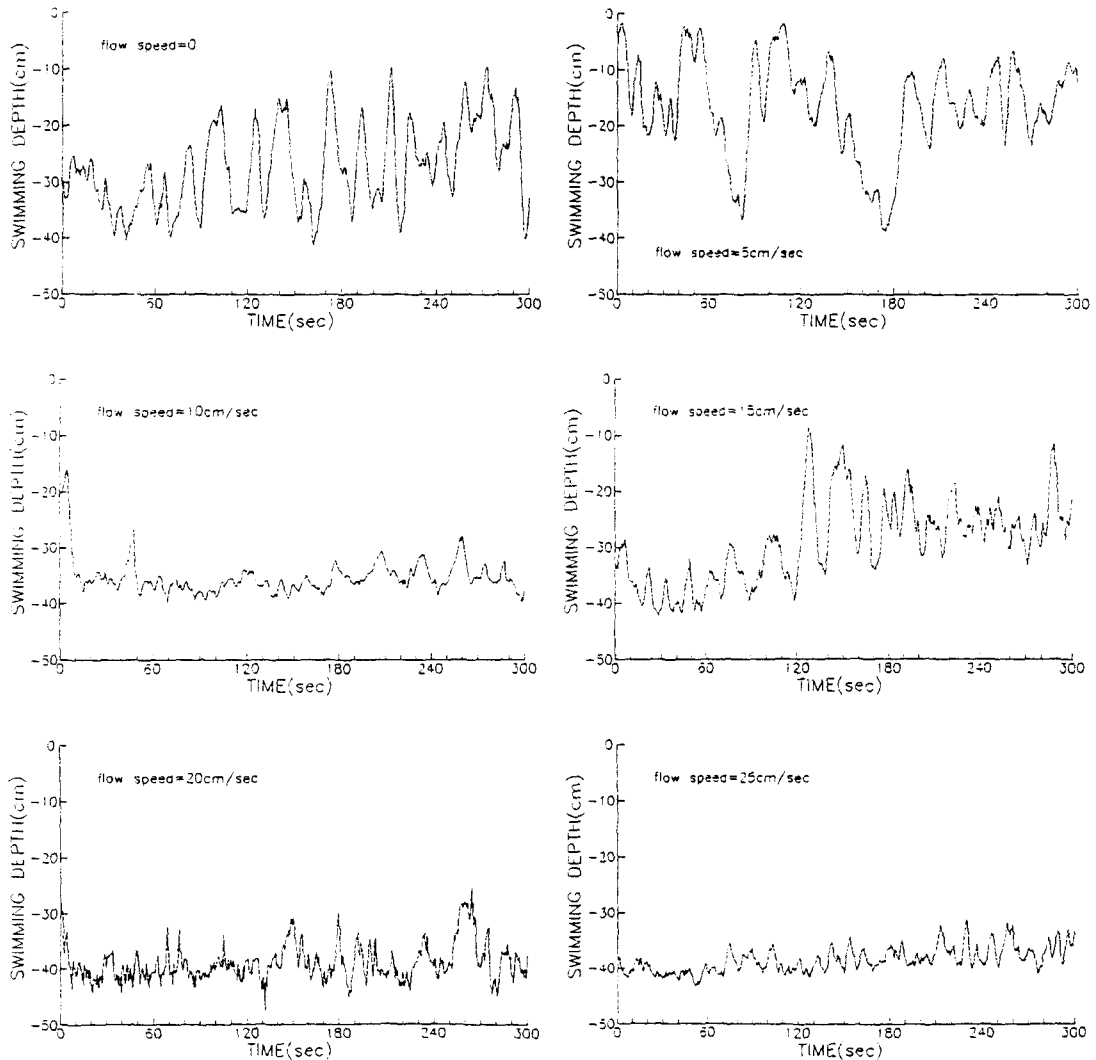


Fig. 7. Variation of the mean swimming depth according to the flow speed( $N_f=10$ ).



**Table 3. Mean dimensions of rainbow trout schools in the experimental water tank**

Flow speed (cm/sec)	No. of fish	School dimensions(cm)		
		Length(X-axis)	Breadth(Y-axis)	Height(Z-axis)
0	1	—	—	—
	2	18.2	14.2	7.7
	3	15.5	18.2	6.5
	5	39.7	26.4	16.1
	7	30.7	28.9	22.0
	10	34.3	34.1	23.7
5	10	46.6	44.6	25.5
10	10	50.7	35.1	11.3
15	10	46.6	57.6	22.3
20	10	44.9	42.1	7.1
25	10	46.5	47.5	7.5

방향의 크기의 平均相對比는 2.8 : 2.7 : 1로서, Radakov(1973)의 研究에서 浮魚群의 形狀에 對해 調査한 結果와 비슷한 比率이었던 데, 이것은 井上 등(1979)의 研究에서와 같이 群을 형성하는 各 個體의 相互視認에 의하여 位置選擇이 上下方 向보다 左右方 向으로 넓어지는 경향이 있는 것으 로 생각된다. 또한, 長谷川 등(1981)의 研究 結果와 비교하면, 무지개송어의 海産魚인 정어리와 유사한 구조를 가지는 것으로 나타났다.

### 要 約

模型 水槽에 對한 魚群行動의 數值 모델링에 關한 研究의 일환으로서 魚群行動의 모델링을 위하 여 魚群行動을 나타내는 運動方程式을 구성하 는 各種 힘들의 parameter를 추정하기 위한 基礎資 料를 提供하고자, 模型 水槽를 설치하지 않은 상 태에서 의 流速 變化에 따른 무지개송어의 遊泳行 動을 畫像處理하여 各 個體의 位置座標로부터 계 산된 遊泳速度, 遊泳 깊이, 水槽의 벽과 個體 사이 의 距離, 個體相互間의 最近接距離, 魚群의 3차원 積 構造 등의 遊泳特性을 調査·分析한 結果는 다 음과 같다.

遊泳軌跡으로부터 무지개송어의 遊泳行動을 살

펴보면, 靜水狀態에서는 水槽 中央部에서 遊泳하 는 빈도가 높았으며, 水槽 벽면으로부터 상당히 떨어져서 旋回運動을 하는 것으로 나타났다.

靜水狀態에서의 平均 遊泳速度는 21.6~23.6 cm/sec(2.5~2.9BL cm/sec)로서 個體數가 많을 수록 體長當 遊泳速度가 빠른 것으로 나타났으며, 流速의 變化에 따른 魚群의 平均遊泳速度는 流速이 증가할수록 遊泳速度도 증가하여 流速이 25 cm/sec인 경우에는 遊泳速度가 30.6 cm/sec(3.8BL cm/sec)에 달하였다.

魚群의 平均 遊泳 깊이는 17~38 cm로서 주로 中層의 깊이에서 유영하였으며, 流速이 빨라질수록 遊泳 깊이가 깊어지고 遊泳 깊이의 變化가 적어졌 다.

水槽의 벽과 個體 사이의 平均 距離는 17.6~21. 4 cm였으며, 流速이 빨라질수록 水槽의 벽과 個體 사이의 距離가 다소 멀어지는 경향을 나타내었다.

個體相互間의 最近接距離는 個體數가 많을수록 가까워지며, 流速의 變化에 따른 個體相互間의 最 近接距離의 平均値는 3.0~5.9 cm(0.4~0.7BL cm)로 나타났다.

魚群의 3차원積 構造는 群을 형성하는 個體數 가 증가함에 따라 群의 形狀이 길이, 폭 및 깊이의 모든 方向으로 넓어지며, 流速이 빨라질수록 길이

방향과 폭 방향의 크기가 깊이 방향에 비해 상대적으로 커져 각 방향의 平均 相對比는 2.8 : 2.7 : 1이었다.

### 參考文獻

- 1) Bainbridge, R. (1958) : The speed of swimming of fish as related to size and to the frequency and amplitude of tail beat. *J. Exp. Biol.* 35(1), 109-133.
- 2) Cullen, J. M., E. Shaw and H. A. Baldwin (1965) : Methods for Measuring the Three-Dimensional Structure of Fish Schools. *Anim. Behav.* 13, 534-543.
- 3) Matuda, K., Z. Liang and N. Sannomiya (1993) : Comparison among fish species of parameters in a fish behavior model. *ICES Mar. Sci. Symp.* 196, 103-107.
- 4) Pitcher, T. J. (1973) : The Tree-Dimensional Structure of Schools in the Minnow, *Phoxinus phoxinus*(L.). *Anim. Behav.* 21, 673-686.
- 5) Radakov, D. V. (1973) : Schooling in the Ecology of Fish. *Israel Program for Scientific Translations*. pp 173.
- 6) 三宮信夫·中峯浩·岩崎永彌 (1990) : 魚群行動を表する物理モデルの妥當性の検討. システム制御情報學會論文誌 3(1), 14-20.
- 7) 長谷川英一·坪井均 (1981) : 2臺のカメラによる海産魚類の群れ構造の三次元的解析. うみ 19, 179-184.
- 8) 井上實·長谷川英一·有元貴文 (1979) : パラタナゴおよびアブラハヤの群れ構造の光學的測定とその解析. うみ 17, 92-103.