

# 물고기 로봇의 직진 주행 시뮬레이션과 실험 Straight Line Swimming Simulation and Experiment of Robotic Fish

\*김석우<sup>1</sup>, 박해원<sup>1</sup>, 조강진<sup>1</sup>, 박노철<sup>1</sup>, #양현석<sup>1</sup>, 박영필<sup>1</sup>

\*S. W. Kim<sup>1</sup>, H.W. Park<sup>1</sup>, K.J. Cho<sup>1</sup>, N. C. Park<sup>1</sup>, #H. Y. Yang(hsyang@yonsei.ac.kr)<sup>1</sup>, Y. P. Park<sup>1</sup>  
<sup>1</sup> 연세대학교 기계공학과

Key words : Robotic Fish, Propulsion, Simulation, Swimming Experiment

## 1. 서론

잠수정 추진에 있어서 물고기 형태의 추진은 후방 스크루 프로펠러를 이용한 추진방식에 비해 효율이 좋고[1] 빠른 주행이 가능하다. 또한 기동성이 높아 기민한 동작이 가능하고 소음이 적어 군사용 목적이나 탐사용 목적으로 활발한 연구가 진행되고 있다.

MIT 에서는 1994 년 최초로 개발된 물고기 로봇 RoboTuna[2]를 시작으로 RoboPike[3]와 VCUUV[4]를 후속 개발하였다. 일본 Tokyo Institute of Technology 에서는 1995 년을 첫 번째 모델을 시작으로 3 가지 돌고래 로봇을 제작하고 연구한 바가 있고[5], 영국 University of Essex 에서는 물고기의 움직임을 흡사하게 모방하여 급속한 방향 전환이 가능한 로봇을 개발하였다[6]. 이 밖에 미국 University of Washington[7]과 중국 Peking University[8]에서도 물고기 로봇을 연구 중이다.

본 논문에서는 연세대학교에서 개발된 물고기 로봇[9]을 시뮬레이션과 실험 대상으로 삼았다. 물고기 로봇의 가장 기본적인 직진 주행 해석을 위한 2 차원 운동 방정식과 시뮬레이션 방법을 제시하고, 해석을 검증하기 위한 실험 환경을 소개했다. 그리고 해석 결과와 실험 결과를 비교, 분석하였다.

Fig.1 은 로봇의 외관 사진이며, 하드웨어에 관련한 사항은 참고논문[9]에 기록되어 있다.

## 2. 모델링 및 시뮬레이션

가슴 지느러미가 없는 상태의 물고기 로봇의 몸통을 타원체로 단순화 하여 모델링 하였다. 유체 안에서 강체가 갖는 2 차원 평면 운동 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다[10].

$$\underline{M}(\dot{\nu}) + \underline{C}(\nu)\nu + \underline{D}(\nu)\nu + \underline{g}(\eta) = \tau \quad (1)$$

$\underline{M}$  는 added mass 를 포함한 타원체의 질량과 inertia 에 관한 행렬이고,  $\underline{C}$  는 added mass 를 포함한 타원체의 Coriolis force 와 구심력에 관한 행렬,  $\underline{D}$  는 타원체가 갖는 감쇠 행렬,  $\underline{g}$  는 중력에 의해 타원체에 작용하는 힘과 모멘트, 그리고  $\tau$  는 외력을 나타내는 벡터이다. 각 행렬의 정확한 수치는 참고문헌[11]에 표기되어 있다. 위 식에 나타난 벡터들은 다음과 같이 표현된다.

$$\nu = [u, v, r]^T \quad (2)$$

$$\eta = [x, y, \psi]^T \quad (3)$$



Fig.1 Photograph of Robotic Fish Developed in Yonsei University

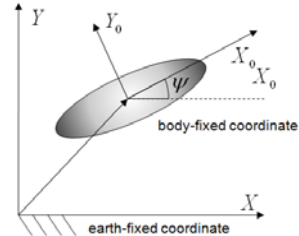


Fig.2 Coordinate Description

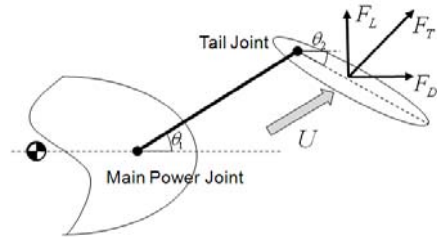


Fig.3 Propulsion Modeling

Fig.2 는 시뮬레이션 과정에서 쓰인 좌표계에 관해 표시한다. 위 식에서  $u, v, r$  은 각각 몸체 고정 좌표계에서  $X_0$  방향 선 속도,  $Y_0$  측면 방향 선 속도,  $Z_0$  방향으로의 회전 속도를 의미한다. 또한  $x, y, \psi$  은 각각 지구 고정 좌표계에서  $X$  방향 위치,  $Y$  방향 위치,  $Z$  방향 회전각을 의미한다. 몸체 고정 좌표계  ${}^E p$  에서 지구 고정 좌표계  ${}^E p$  로 변환하기 위한 과정은 다음과 같다.

$$R = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^E p = R^B p \quad (5)$$

추진력을 계산하는 과정은 다음과 같다. 몸통에 고정된 주 동력 관절부터 꼬리 관절까지를 질량이 없고 가는 bar 형태의 링크로 유체의 저항을 무시할 수 있다고 가정한다. 또 꼬리 지느러미를 질량이 없고 면적이  $S$  인 링크로 가정한다. Fig.3 과 같이 두 링크가 기준선에 대해 각각  $\theta_1, \theta_2$  의 각도로 위치해 있고, 유속이  $U$  일 때 꼬리 지느러미에 작용하는 양력  $F_L$  과 항력  $F_D$  는 다음과 같다.

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho U^2 S \quad (6)$$

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 S \quad (7)$$

여기서  $C_L$  은 꼬리 지느러미의 양력 계수,  $C_D$  는 항력 계수,  $\rho$  는 물의 밀도를 의미한다. 꼬리 지느러미에 작용하는 힘  $F_T$  는 다음과 같다.

$$F_T = F_L + F_D \quad (8)$$

시뮬레이션은 다음과 같이 수행하였다. 두 개의 꼬리 링크가  $90^\circ$  의 각도 지연을 가지고 특정한 각속도로 왕복운동을 할 때, 그 속도와 위치에 따라 발생하는 힘  $F_T$  를 계산한다. 이 힘을 타원체의 주 동력 관절에 작용했을 때, 타원체의 움직임을 식(1)을 이용해 푼다. 식(1)을 풀기 위하여 4 계 Runge-Kutta method 를 사용하였다.

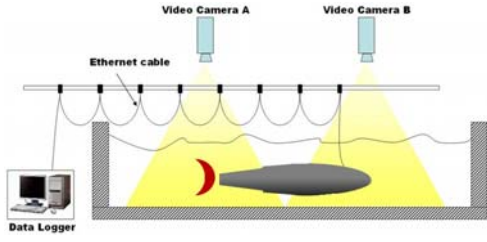


Fig.4 Experiment Set

3. 실험 환경

직진 주행 실험은 실험실 내의 7.8m×1.8m×0.9m 이동식 수영장에서 이루어졌다. 물의 깊이는 50cm 이고 로봇은 수면에서 움직이게 하였다. 로봇이 움직임에 따라 이더넷 케이블도 움직여야 하기 때문에, 케이블의 저항을 최소화하기 위해 수영장 길이 방향으로 가이드를 설치하였다.

수영장 전체를 영상에 담기 위해 PGR 사의 카메라 모듈 두 개를 2.3m 높이의 천장에 3m 간격으로 설치하였다. C 언어로 작성된 프로그램을 통해 두 카메라를 동시에 초당 30 프레임으로 녹화하고, 수면 높이에서 이어질 수 있도록 한 프레임씩 좌우로 합성하였다. Fig.4 는 가이드와 2 대의 카메라 설치 방식을 나타낸다.

시뮬레이션 조건과 같게 하기 위하여 가슴 지느러미가 없는 상태로 실험을 수행하였고, 잔잔한 상태에서 실험을 시작하였다. 꼬리 진폭이 입력한 진폭과 같아지기 전까지 로봇을 고정하였다가, 입력한 진폭으로 다가간 후 로봇이 진행하도록 하였다. 주 동력 관절과 꼬리 관절의 phase delay 는 90° 로 고정하였다. 실험은 수면에서 행해졌으며, 실험 구간은 외벽 충돌 직전까지 총 5m 구간이다.

미리 수면 높이에 표시한 30cm 간격의 구간을 이용하여, 합성된 영상에서 로봇의 머리가 30cm 간격의 진행방향과 수직한 선을 통과하는 시간을 알아냈다. 이 시간을 이용해 각 구간별 평균 속도를 계산하였다.

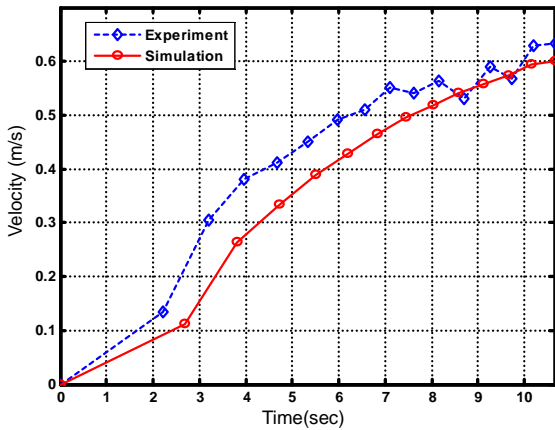


Fig.5 Simulation and Experimental Result of 1.5Hz case

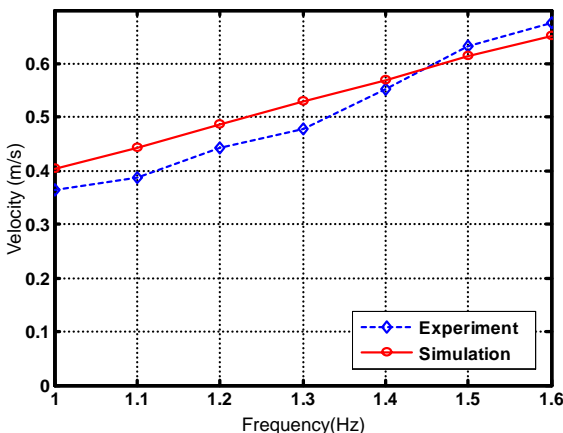


Fig.6 Simulation and Experimental Result of Maximum Velocity

4. 해석 및 실험 결과

Fig.5 는 주 동력 관절과 꼬리 관절의 진폭을 각각 15° 씩으로 하고, 1.5Hz 의 속도로 구동하였을 때 시간 변화에 따른 속도 변화에 관해 해석과 실험 결과를 나타낸 그래프이다. 각 구간에서 해석 결과가 실험 결과보다 작게 나타나지만, 가속되는 경향이 같음을 볼 수 있다. 8 초에서 10 초 구간에서 실험결과가 고르지 못한 원인은 로봇이 벽과 가까워지면서 맞부딪히는 물결에 의한 영향이 증가하기 때문으로 간주된다.

Fig.6 은 진폭은 앞 실험과 동일하게 하고 구동 속도를 1.0Hz 부터 1.6Hz 까지 0.1Hz 간격으로 직진 주행 실험을 했을 때, 실험 구간 내에서 기록한 최고 속도를 해석 결과와 비교한 그래프다. 실험 결과는 각 주파수에서 3 회 실험의 평균값이다. 해석과 실험 결과가 비슷한 경향을 보이고 있는 것을 알 수 있다. 실험 구간 내에서 로봇이 낼 수 있는 최고 속도는 1.6Hz 로 구동 했을 때 0.7m/s 였다

5. 결론

물고기의 움직임을 모방한 로봇을 모델링하여 2 차원 운동 방정식을 정립하였다. 해석의 타당성을 검증하기 위한 물고기 로봇의 직진 주행 실험을 실행하였다. 시뮬레이션과 실험이 비슷한 경향을 나타내는 결과를 얻을 수 있었고, 이로서 해석 방법에 대한 타당성을 얻을 수 있었다.

참고문헌

1. D. S. Barrett, "The Design of a Flexible Hull Undersea Vehicle Propelled by an Oscillating Foil" Master Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1994
2. D. S. Barrett, "Propulsive Efficiency of a Flexible Hull Underwater Vehicle," Ph. D. dissertation, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
3. J. M. Kumph, "The Design of a Free Swimming Robot Pike," Bachelor thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1996.
4. J. M. Anderson, P. A. Kerrebrock, "The Vorticity Control Unmanned Undersea Vehicle - An Autonomous Vehicle Employing Fish Swimming Propulsion and Maneuvering," Proceedings of the 10<sup>th</sup> international Symposium on Unmanned Unthethered Submersible Technology, pp 189-195, 1997.
5. Nakashima, M. and Ono, K., "Dynamics of Two-Joint Dolphinlike Propulsion Mechanism," Trans. Jpn. Soc. Mech Eng., Vol. 62, No.600, pp 3044-3051, 1996.
6. J. Liu, I. Dukes, R. Knight, H. Hu, "Development of Fish-like Swimming Behaviours for an Autonomous Robotic Fish" Proceedings of the. Control' 04, IEE, ID217, University of Bath, England, 6-9. September, 2004.
7. K. A. Morgansen, B. I. Triplett, D. J. Klein, "Geometric Methods for Modeling and Control of Free-Swimming Fin-Actuated Underwater Vehicles" IEEE Transactions on Robotics, vol. 23, No. 6, December 2007.
8. J. Yu, L. Wang, M. Tan, "Geometric Optimization of Relative Link Lengths for Biomimetic Robotic Fish" IEEE Transactions on Robotics, vol. 23(2), 382-386, 2007.
9. 조강진, 박해원, 김석우, 양형석, 박영필, 박노철, "물고기의 추진을 모방한 로봇의 개발" 대한기계학회 2007년도 춘계학술대회 강연 및 논문 초록집, 40-45, 2007.
10. T. I. Fossen, "Guidance and Control of Ocean Vehicles", John Wiley & Sons, J. N. Newman, "Marine Hydrodynamics," The MIT Press, 1994.
11. H.-W. Park, "Design, Analysis, and Experiment of a Dolphin Robot", Master Thesis, Yonsei University, 2007