

생체모방형 물고기 로봇 '익투스'의 동적 해석을 위한 DOE를 이용한 입력파라미터 최적화

Optimization of Input Parameters by Using DOE for Dynamic Analysis of Bio-inspired Robotic Fish 'Ichthus'

정 창 현, 이 상 효, 김 경 식, 차 유 성, 류 영 선*

(Chang-Hyun Chung¹, Sang-Hyo Lee¹, Kyoung-Sik Kim², You-Sung Cha², and Young-Sun Ryuh²)

¹University of Science & Technology

²Korea Institute of Industrial Technology

Abstract: Recently, there is a rising interest on studying bio-inspired robotic fish because of real fish's great maneuverability and high energy efficiency. However, the researches about the robotic fish have not been done so much and there are still lots of problems to use them in the real environment such as in the river. This paper describes a bio-inspired robotic fish 'Ichthus' which is developed in KITECH and has 3 DOF propulsive mechanism. We develop the dynamic motion equation of 'Ichthus' in the underwater environment and analyze response characteristics of 'Ichthus' according to the input parameters of tail fin's amplitude and oscillation frequency. Then we propose control parameters at the various velocities. These parameters are useful to increase energy efficiency and it can be used when the fish robot moves in the real environment, for example, we can propose proper amplitude and oscillation frequency when the fish robot passes through the narrow space between obstacles.

Keywords: Ichthus, robotic fish, dynamic analysis, propulsion, propulsive, DOE

I. 서론

수중로봇은 해양 탐사와 자원채취 등의 목적으로 널리 사용되고 있다. 이러한 목적을 수행하기 위해서는 높은 효율의 추진능력과 뛰어난 동적특성을 필요로 한다[1]. 하지만 기존의 프로펠러를 이용하여 추진하는 수중로봇들은 일반적으로 효율과 동작 능력 면에서 좋은 특성을 가지고 있지 못하다. 추진 능력은 최대 효율이 70%를 넘어가지 못하여 탐사거리가 짧고 필요로 하는 배터리의 용량이 커져서 기기 탑재능력이 떨어진다. 또한 회전반경이 필요이상으로 크고 장애물에 대한 회피속도가 느리기 때문에 좁은 공간에서의 이동 및 탐사에 적합하지 않다[2]. 이에 대한 해결책으로 물고기의 유영을 모방한 수중 로봇을 만들려는 연구가 진행되고 있다.

첫째, 물고기의 유영 메커니즘은 일반적으로 사용하고 있는 프로펠러 식 추진방식보다 20% 이상 효율이 좋은 것으로 알려져 있다. 실제로 1994년 MIT가 진짜 참치 지느러미와 유체역학적으로 거의 비슷하게 설계한 로봇 참치로 실험한 결과 프로펠러보다 지느러미가 훨씬 효율적인 것으로 밝혀졌다. 지느러미는 프로펠러의 날보다 더 넓은 면적

의 물을 밀어내기 때문에 그만큼 더 큰 추진력을 얻을 수 있으며 결과적으로 프로펠러의 에너지 효율은 70%인데 비해 로봇 참치의 지느러미는 87%나 됐다[3].

둘째, 물고기들은 보통의 수중로봇보다 뛰어난 기동성을 보여준다. 물고기는 자신의 몸길이의 10분의 1의 거리만 있어도 반대로 회전해 뒤돌아갈 수 있다. 반면 인간이 개발한 잠수함은 속도를 늦춰서 회전을 해야 하기 때문에 10배 정도의 거리가 필요하다[4].

본 연구실에서는 먼저 수중로봇의 기동성 향상을 위하여 새로운 메카니즘의 옆 지느러미를 제안하고 실험한바 있다 [5]. 본 논문에서는 한국생산기술연구원에서 개발된 물고기 로봇 '익투스'의 효율적인 유영을 위하여 '익투스'의 동역학을 계산하고, 유체의 힘에 대한 모델을 유도하여 물속에서 유영하는 물고기 로봇의 유영속도와 이 때 각 축의 모터에 걸리는 토크 값을 계산할 수 있는 시뮬레이션을 작성하였다. 작성된 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 실험계획을 작성하고 이로부터 특정 속도 구간에서 가장 적은 토크 값으로 유영할 수 있는 제어 파라미터 값들을 제안하고자 한다[6].

II. '익투스'의 운동방정식

1. Mechanism model

본 논문에서 모델로 하고 있는 '익투스'는 실제 물고기와 같이 꼬리를 좌우로 움직이면서 유영하며 몸통과 꼬리는 3개의 joint로 구성되어 있다. 각 joint에는 RC 서보 모터가 로봇의 frame과 연결되어 있어서 RC 서보 모터를 이용하여 몸통 움직임의 진폭과 주파수를 조절할 수 있다.

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2010. 4. 16., 수정: 2010. 6. 4., 채택확정: 2010. 6. 10.

정창현, 이상효: 과학기술연합대학원대학교 지능형로봇공학과

(kcta2266@kitech.re.kr / realwolf@kitech.re.kr)

김경식, 차유성: 한국생산기술연구원

(kskim22@kitech.re.kr / eumji@kitech.re.kr)

류영선: 한국생산기술연구원/UST 지능형로봇공학과(ysryuh@kitech.re.kr)

※ 본 논문은 2010년도 ICROS 학술대회에서 초안이 발표되었습니다.

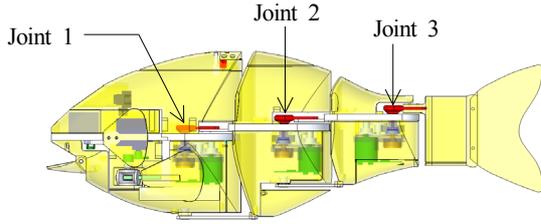


그림 1. ‘익투스’ 메카니즘 모델.
Fig. 1. Mechanism model of ‘Ichthus’.

표 1. ‘익투스’ 기본 사양.
Table 1. Specifications of ‘Ichthus’.

body size	420mm(L) x 80mm(W) x 130mm(H)
weight	1.2 kg
자유도	6 (꼬리지느러미 3, 옆 지느러미 2, 입&아가미 1)
battery	7.4V Lipo

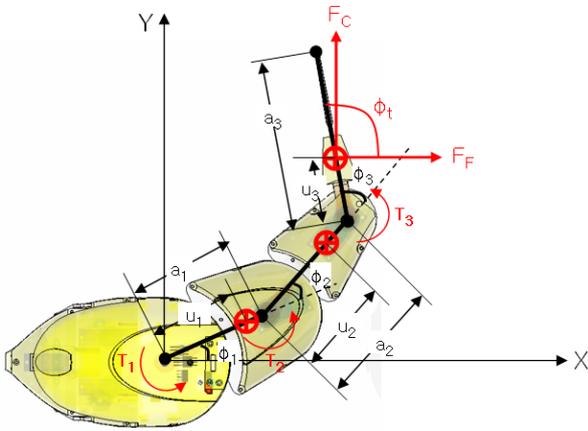


그림 2. ‘익투스’의 분석 모델.
Fig. 2. Analytical Model of ‘Ichthus’.

2. ‘Ichthus’ dynamic model

시뮬레이션을 단순화하게 하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. Thrust force FF와 lateral force Fc는 꼬리지느러미(link 3)에만 작용한다. Yawing과 y축 방향의 motion은 고정되어있다[7].

이와 같은 가정으로부터 물고기 로봇의 동역학 식은 끝단에 외부로부터 힘을 받는 3 자유도의 serial link 로봇과 같은 방식으로 dynamic model을 구성할 수 있다.

따라서 각 joint에 걸리는 torque 값은 다음과 같은 식으로 구할 수 있다.

$$T_{\Phi} = [L_{\Phi\Phi}^*] \ddot{\Phi} + \dot{\Phi}^T [P_{\Phi\Phi\Phi}^*] \dot{\Phi} - [G_{\Phi}^U]^T T_U \quad (1)$$

여기서 $L_{\Phi\Phi}^*$ 는 effective inertia 이며, $P_{\Phi\Phi\Phi}^*$ 는 변화하는 system inertia를 나타낸다[8].

$$[L_{\Phi\Phi}^*] = \begin{bmatrix} I_{11}^* & I_{12}^* & I_{13}^* \\ I_{21}^* & I_{22}^* & I_{23}^* \\ I_{31}^* & I_{32}^* & I_{33}^* \end{bmatrix}$$

$$I_{11}^* = ([\bar{I}_1 + \bar{M}_1 u_1^2] + [\bar{I}_2 + \bar{M}_2 u_2^2] + [\bar{I}_3 + \bar{M}_3 u_3^2] + \bar{M}_2 l_1^2 + \bar{M}_3 [l_1^2 + l_2^2] + (2\bar{M}_2 l_1 u_2 \cos \Phi_2 + 2\bar{M}_3 [l_1 l_2 \cos \Phi_2 + l_2 u_3 \cos \Phi_3 + l_1 u_3 \cos (\Phi_2 + \Phi_3)])$$

$$I_{21}^* = I_{12}^* = ([\bar{I}_2 + \bar{M}_2 u_2^2] + [\bar{I}_3 + \bar{M}_3 u_3^2] + \bar{M}_3 l_2^2) + (2\bar{M}_2 l_1 u_2 \cos \Phi_2 + \bar{M}_3 [l_1 l_2 \cos \Phi_2 + 2l_2 u_3 \cos \Phi_3 + l_1 u_3 \cos (\Phi_2 + \Phi_3)])$$

$$I_{31}^* = I_{13}^* = ([\bar{I}_3 + \bar{M}_3 u_3^2]) + (\bar{M}_3 [l_2 u_3 \cos \Phi_3 + l_1 u_3 \cos (\Phi_2 + \Phi_3)])$$

$$I_{22}^* = ([\bar{I}_2 + \bar{M}_2 u_2^2] + [\bar{I}_3 + \bar{M}_3 u_3^2] + \bar{M}_3 l_2^2) + (2\bar{M}_3 l_2 u_3 \cos \Phi_3)$$

$$I_{32}^* = I_{23}^* = ([\bar{I}_3 + \bar{M}_3 u_3^2]) + (\bar{M}_3 l_2 u_3 \cos \Phi_3)$$

$$I_{33}^* = ([\bar{I}_3 + \bar{M}_3 u_3^2])$$

$[P_{\Phi\Phi\Phi}^*]$ 는 3차원 배열의 행렬이며 아래와 같이 표현된다.

$$[P_{n\Phi\Phi}^*] = \begin{bmatrix} P_{n11}^* & P_{n12}^* & P_{n13}^* \\ P_{n21}^* & P_{n22}^* & P_{n23}^* \\ P_{n31}^* & P_{n32}^* & P_{n33}^* \end{bmatrix} = n^{th} \text{ plane of } [P_{\Phi\Phi\Phi}^*]$$

$$[P_{1\Phi\Phi}^*] = \begin{bmatrix} P_{111}^* & P_{112}^* & P_{113}^* \\ P_{121}^* & P_{122}^* & P_{123}^* \\ P_{131}^* & P_{132}^* & P_{133}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & A & B \\ A & A & B \\ B & B & B \end{bmatrix}$$

$$[P_{2\Phi\Phi}^*] = \begin{bmatrix} P_{211}^* & P_{212}^* & P_{213}^* \\ P_{221}^* & P_{222}^* & P_{223}^* \\ P_{231}^* & P_{232}^* & P_{233}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -A & 0 & C \\ 0 & 0 & C \\ 0 & C & C \end{bmatrix}$$

$$[P_{3\Phi\Phi}^*] = \begin{bmatrix} P_{311}^* & P_{312}^* & P_{313}^* \\ P_{321}^* & P_{322}^* & P_{323}^* \\ P_{331}^* & P_{332}^* & P_{333}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -B & -C & 0 \\ -C & -C & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

여기서

$$A = -\bar{M}_2 l_1 u_2 \sin \Phi_2 - \bar{M}_3 (l_1 l_2 \sin \Phi_2 + l_1 u_3 \sin (\Phi_2 + \Phi_3))$$

$$B = -\bar{M}_3 (l_2 u_3 \sin \Phi_3 + l_1 u_3 \sin (\Phi_2 + \Phi_3))$$

$$C = -\bar{M}_3 l_2 u_3 \sin \Phi_3$$

각 link의 관성모멘트와 질량, 질량 중심까지의 거리는 3D CAD 를 이용하여 구하였다.

식 (1)에서 $[G_{\Phi}^U]$ 는 joint의 각속도와 꼬리지느러미의 속도 관계를 나타내는 Jacobian으로 유체로부터 작용되는 thrust force FF 와 lateral force Fc를 각 joint 에서의 torque 로 변환할 수 있다.

3. Model of fluid force

유체 힘의 모델링에서는 thrust force가 주로 꼬리지느러미에서 발생되며 유체의 의한 drag force는 물고기 로봇의 body 부분에만 작용하는 것으로 가정하였다.

그림 3에서 FV는 꼬리지느러미의 운동에 의해서 발생하는 관성이다. 크기는 각가속도의 크기에 비례하며 방향은 역방향이다.

$$F_V = -\pi \rho L C^2 (\dot{U} \sin \alpha + \dot{\alpha} U \cos \alpha) \quad (2)$$

여기서, U는 꼬리지느러미에서 발생하는 상대 속도이며 α

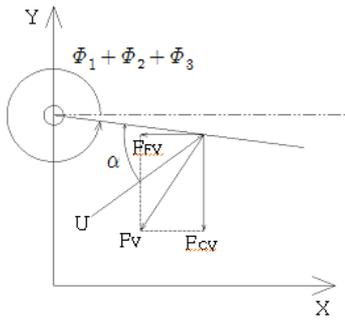


그림 3. 유체의 관성력 모델.
Fig. 3. Model of inertial fluid force.

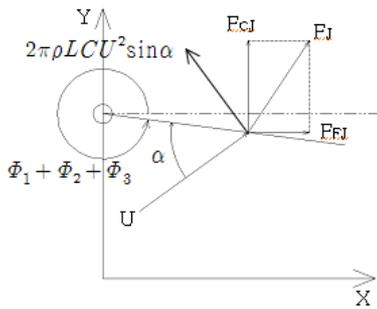


그림 4. 부력 모델.
Fig. 4. Model of lift force.

는 attack angle, C는 꼬리지느러미의 chord length, L은 span 이며, 물의 밀도 ρ 는 998 kg/m³이다.

꼬리지느러미의 회전 운동 시 U에 의해 발생하는 양력은 U의 수직으로 작용하며 실제 꼬리지느러미에 발생하는 힘 F_J는 식 (3)과 같다.

$$F_J = 2\pi\rho LCU^2 \sin\alpha \cos\alpha \quad (3)$$

따라서 x방향 thrust force 성분 F_F와 y방향 lateral force 성분 F_C는 (4),(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_F = F_{FV} + F_{FJ} \quad (4)$$

$$F_C = F_{CV} + F_{CJ} \quad (5)$$

한편 drag force F_D는 물고기 로봇의 main body에 작용하는 것으로 가정하며, 다음과 같다.

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 S \quad (6)$$

여기서 C_D는 drag coefficient, V는 상대추진속도, S는 main body가 유체 흐름의 수직인 면에 투영된 면적이다. 본 논문에서 C_D는 0.5로 계산하였다.

또한 물고기 로봇의 진행 방향을 x축 방향으로 제한한다면 꼬리지느러미의 중심점에서의 y축 방향 상대속도는 다음과 같다.

$$u = l_1 \cos\phi_1 \dot{\phi}_1 + l_2 \cos(\phi_1 + \phi_2) (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2) + a_3 \cos(\phi_1 + \phi_2 + \phi_3) (\dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2 + \dot{\phi}_3) \quad (7)$$

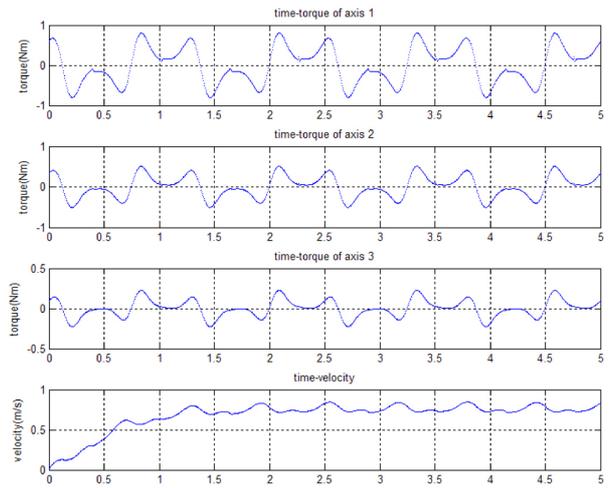


그림 5. 시뮬레이션 결과. 순서대로 조인트 1 토크, 조인트 2 토크, 조인트 3 토크, 속도(입력값이 0.8 Hz, 진폭 20 deg, 유속 0.03 m/s 일때).

Fig. 5. Results of Simulation. In order joint 1 torque, joint 2 torque, joint 3 torque, velocity(Input : 0.8 Hz, Amplitude 20 deg, Um 0.03 m/s).

x축 방향의 유속인 U_m 과 u는 서로 직교하기 때문에 U는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$U^2 = U_m^2 + u^2 \quad (8)$$

4. Simulation 작성

시뮬레이션은 Matlab을 이용하였으며, 식 (9)로부터 물고기 로봇의 가속도를 계산하고, Runge-Kutta 공식을 이용하여 로봇의 속도를 도출하였다.

$$M\ddot{x}_G = F_F - F_D \quad (9)$$

여기서 M은 물고기 로봇의 전체 질량, x_G 는 질량중심, F_F는 total thrust, F_D는 total drag force. 시뮬레이션은 각 joint의 진폭과 주기를 입력 값으로 받아서 joint 별 torque 값과 물고기 로봇의 x축 방향 유영속도를 계산한다.

III. 실험계획법을 이용한 최적화

1. 요인실험[9]

RC 서보 모터의 진폭과 주기를 조절하여 물고기 로봇의 속력을 조절할 수 있으며, 각 인자들의 조합에 따라 같은 속도를 내더라도 모터에 토크가 많이 걸릴 수도 있고, 적게 걸릴 수도 있다. 따라서 일정 속도 구간에서의 RMS torque값이 가장 작은 값을 갖도록 실험계획법을 이용하여 모터의 진폭과 주기의 입력값을 최적화를 하였다.

표 2. 요인실험을 위한 인자 및 수준.

Table 2. Factor and level for full factorial design.

	Amplitu de1(deg)	Amplitu de2(deg)	Amplitu de3(deg)	Frequency (Hz)
수준 1(+1)	35	35	35	2.5
수준 2(-1)	5	5	5	0.5

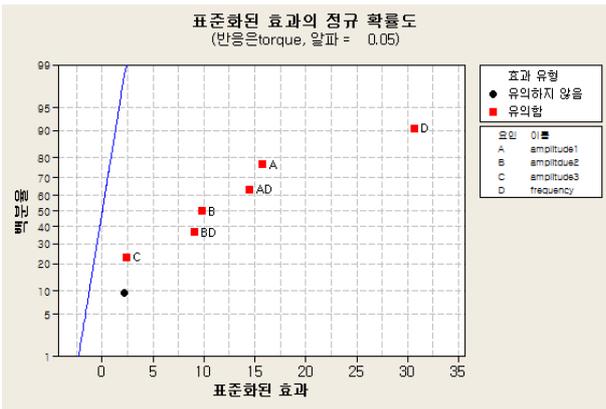


그림 6. RMS 토크 값에 대한 인자별 효과의 정규 확률도.

Fig. 6. Effects of a standardized normal probability for RMS torque.

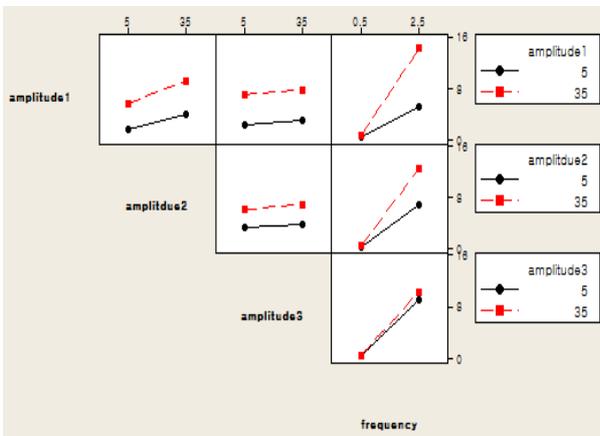


그림 7. RMS 토크 값에 대한 교호 작용도.

Fig. 7. Plot of interaction for RMS torque.

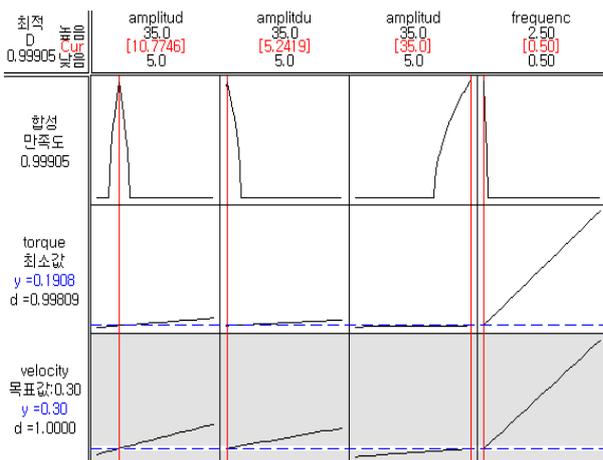


그림 8. 최적화 결과 (목표속도 0.3m/s일 때, 진폭1: 10.77 deg, 진폭2: 5.24 deg, 진폭3: 35deg, 진동수: 0.5Hz, 입력시 RMS 토크: 0.1908Nm).

Fig. 8. Result of optimization (When target velocity is 0.3m/s, optimized RMS torque is 0.1908Nm. Input values are Amplitude1: 10.77 deg, Amplitude2: 5.24 deg, Amplitude3: 35deg and Frequency: 0.5Hz).

표 3. 목표속도에 따른 입력값과 simulation 결과.

Table 3. Input values according to the target velocity and result of simulation.

목표 속도 (m/s)	입력값(최적화 도구에서 계산)				Simulation 결과	
	Amplitude 1 (deg)	Amplitude 2 (deg)	Amplitude 3 (deg)	frequency (Hz)	속도 (m/s)	Trms (Nm)
0.3	10.77	5.24	35	0.5	0.31	0.19
0.5	7.14	35	35	0.5	0.53	0.35
0.7	23.99	35	35	0.5	0.68	0.57
1	7.25	10.31	35	1.6	1.04	1.89
1.5	20	20	31.18	1.44	1.62	3.13
1.8	5	34.99	5	2.31	1.89	5.66

표 4. 기존 입력값과 simulation 결과.

Table 4. Simulation result with previous input values.

입력값				Simulation 결과	
Amplitude 1 (deg)	Amplitude 2 (deg)	Amplitude 3 (deg)	Frequency (Hz)	속도 (m/s)	Trms (Nm)
15	15	20	0.8	0.66	0.67
20	20	20	1.5	1.57	3.18

우선은 속도에 영향을 주는 인자로 각 조인트의 모터 amplitude와 frequency를 선정하였다. 각 모터마다 frequency를 달리 할 수 있으나, 각 축의 자연스러운 motion 구현을 위하여 하나의 frequency 값으로 통일하였다. 각 인자에 대하여 2 수준씩 고려하여 모든 수준조합에서 실험하였다.

2. 요인 실험 결과

각 모터의 amplitude와 frequency가 물고기 로봇의 토크 값에 유의하였으며, 특히 frequency의 유의성이 크게 나왔다. 각 인자별 교호작용은 각 모터의 amplitude와 frequency 간에 유의함을 알 수 있다.

3. 최적화

Minitab의 반응 최적화 도구를 이용하여 특정 속도 구간 ($\pm 10\%$)에서 최소의 RMS torque 값을 갖는 입력 파라미터를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

Minitab의 반응 최적화 도구를 이용하여 얻은 특정 속도 별 입력값을 시뮬레이션에 입력하여 검증한 결과 목표 속도 구간 내에 포함되는 속도를 얻었으며, 이때의 RMS torque 값 또한 예측값과 거의 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

또한 기준에 위치와 속도만을 고려하여 사용하던 입력 파라미터 값들을 시뮬레이션에 입력하여 본 결과, 동역학을 고려한 표 3의 최적화 table 보다 속도는 더 느리면서도 RMS torque 값들은 더 큰 것을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 3 자유도 물고기 로봇 '익투스'의 수학적 초기 모델을 도출하였고 이를 토대로 실험계획법을 이용한 실험을 진행하고, 실험 결과에 따라 특정 속도에서 최소한의 RMS torque 값을 갖는 최적 입력 파라미터들을 구하였다.

다. 최적화된 입력 값을 이용한 실험결과 기존에 적용하였던 값들과 비교하였을 때보다 작은 torque 값으로도 더 빠른 속도를 낼 수 있음을 확인하였다. 본 연구결과를 이용하면 현재 '익투스'의 에너지 효율을 향상시켜 운용시간을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 수중 역학 실험 환경을 구축하여 시뮬레이션을 검증 보완하고, 이를 이용하여 실제 환경에서 일어날 수 있는 많은 경우에 대하여 에너지 최적화 방법을 연구하고자 한다.

참고문헌

[1] K. Hirata, T. Takimoto, and K. Tamura, "Study on turning performance of a fish robot," *Proc. 1st Int. Symp. Aqua Bio-Mech.*, pp. 287-287, 2000.
 [2] 조강진, 박해원, 김석우, 양현석, 박영필, "물고기의 추진을 모방한 로봇의 개발," *대한기계학회*, 40-45, 2007
 [3] 김용환, "바다의 왕자 로봇 물고기," *과학동아* 2005년 8월호, pp. 54-59, 2005.
 [4] 류영선, "물고기형 수중로봇의 유영메커니즘 및 알고리즘 개발(1)," *로봇공학회*, pp. 43-48, 2009.

[5] 정창현, 이상효, 김경식, 차유성, 류영선, "물고기를 모방한 수중로봇의 옆 지느러미 메카니즘 설계," 2009 한국자동제어학술회의, pp. 582-585, Sep. 2009.
 [6] C.-H. Chung, S.-H. Lee, K.-S. Kim, Y.-S. Cha, and Y.-S. Ryuh, "A study on dynamic analysis and propulsive algorithm of 3 DOF fish robot 'Ichthus'," *Proc. of ICROS Annual Conference 2010*, Chuncheon, Korea, pp. 189-190, May 2010.
 [7] M. Nakashima, N. Ohgishi, and K. Ono, "A study on the propulsive mechanism of a double jointed fish robot utilizing self-excitation control," *JSME International Journal*, Series C, vol. 46, no. 3, pp. 982-990, 2003.
 [8] G. B. Chung, B.-J. Yi, and D. J. Lim, "An efficient dynamic modeling methodology for general type of hybrid robotic systems," *Proc. of the 2004 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, New Orleans, USA, pp. 1795-1802, April 2004.
 [9] 이승훈, "Minitab을 이용한 공학통계 자료분석," *이레테크*, 2008.



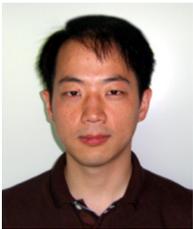
정 창 현

2004년 성균관대 기계공학부 졸업. 2004년~2008년 삼성전자 연구원. 2008년~현재 과학기술연합대학원 대학교 지능형로봇공학과 석사과정. 관심분야는 생체모방로봇, 수중로봇, 기계설계.



이 상 효

2009년 인제대학교 컴퓨터공학부 졸업. 2009년~현재 과학기술연합대학원 대학교 지능형로봇공학과 석사과정. 관심분야는 생체모방로봇, 수중로봇, 제어 및 통신.



김 경 식

2003년 한국항공대학교 전자공학과 졸업. 2005년 동경공업대학 지능시스템 공학 석사. 2009년 동 대학 박사. 2009년~현재 한국생산기술연구원 수중로봇 개발단/연구원. 관심분야는 로봇제어 및 수중로봇.



차 유 성

2005년 성균관대 정보통신공학 졸업. 2007년 동 대학원 석사. 2007년~현재 한국생산기술연구원 수중로봇개발단/연구원. 관심분야는 로봇제어/하드웨어.



류 영 선

1984, 1986년 서울대 바이오시스템 및 소재학부 학, 석사. 1997년 동 대학원 박사(공학박사, 로봇공학). 1989년~1990년 삼성전자. 2000년 (주)삼주기계기술 연구소 소장/이사. 2003년 로보랜드 (주) 대표이사. 2003년~현재 한국생산 기술연구원 수중로봇개발단 단장/과학기술연합대학원대학교 지능형로봇공학과 교수. 관심분야는 생체모방 로봇공학.