

## 추진력 생성을 위한 가오리 날개 짓의 유체-구조연성 수치해석<sup>§</sup>

권 동 현\* · 이 종 수\*\*†

\* 연세대학교 기계공학과, \*\* 연세대학교 기계공학부

### Analysis of Motion of Batoid Fins for Thrust Generation by Using Fluid-Structure Interaction Method

Dong Hyun Kwon\* and Jongsoo Lee\*\*†

\* Dept. of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.,

\*\* School of Mechanical Engineering, Yonsei Univ.

(Received December 30, 2009; Revised August 31, 2010; Accepted September 1, 2010)

**Key Words:** Batoid Fish(가오리 어류), Fin Motion(지느러미 운동), Fluid-Structure Interaction(유체-구조연성, FSI), Frequency(진동수), Amplitude(진폭)

**초록:** 최근 수중 생물체의 특성과 운동성을 가진 생체 모방형 수중로봇의 모방연구가 활발히 진행 되고 있다. 본 논문은 수중에서 기동성과 항해성이 우수한 가오리류 어류 움직임을 모방하여 날개 짓에 의한 속도 및 이동거리를 수치적으로 연구하고자 한다. 유체-구조 연성해석의 방법을 사용하여 3 차원 해석을 실시하였으며, 날개 짓에 의한 큰 변형을 보정하고자 격자 재생성 기능을 사용하였다. 실제 가오리는 날개 진동수에 의해 추진력에 가장 큰 영향을 받는다. 이를 바탕으로 실제 가오리의 움직임과 관련된 파라미터를 이용하여 진동수 및 진폭의 변화에 대하여 최대의 추진력을 갖는 날개의 움직임을 연구하고자 한다.

**Abstract:** Recently, the development of bio-mimetic underwater vehicles that can emulate the characteristic movements of marine fish and mammals has attracted considerable attention. In this study, the motion of the batoid (i.e., cownose ray) fin that facilitates excellent cruising and maneuvering during underwater movement has been studied. The velocity achieved and distance covered with each fin movement are numerically studied. A fluid-structure interaction method is used to perform 3D time-dependent numerical analysis, wherein an adaptive mesh is employed to account for the large deformation of a fin interacting with a fluid. The results of a preliminary study show that the thrust of a ray fin is highly dependent on the frequency. Further, once the fin amplitude required for generating a given thrust is evaluated for the conditions experienced by an actual ray, the frequency and amplitude values for achieving better thrust are determined.

- 기호설명 -

d	: Displacement	(m)	$\mu$	: Viscosity	(kg/ms)
E	: Specific total energy	(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )	$\rho$	: Density	(kg/m <sup>3</sup> )
e	: Specific internal energy	(m <sup>2</sup> /s)	P	: Pressure	(kg/ms <sup>2</sup> )
e <sub>u</sub>	: Velocity strain tensor	(1/s)	$\tau$	: Stress tensor	(kg/ms <sup>2</sup> )
f <sub>B</sub>	: Body force per unit volume	(kgm/s <sup>2</sup> )	<b>u</b>	: Velocity vector	(m/s)
$\lambda$	: Second fluid viscosity	(kg/ms)			
I	: Diagonal matrix				

### 1. 서 론

최근 지능형 재료 및 제어 관련기술의 발달로 수 만년 동안 진화를 거듭해온 자연계의 생체에 대한 모방연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 수중에서 유행하는 수중로봇의 연구로 해양탐사, 오염물질 추적 등의 역할을 할 수 있을 뿐 아니라,

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회(2009.

11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, jleej@yonsei.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

정찰, 감시 등의 군사적인 임무를 수행할 수 있는 자율수중수송체(Autonomous Underwater Vehicles, AUV)가 개발 중에 있거나 개발 되어 실제 운용 중에 있다. 이러한 형태의 연구들은 저비용 고효율적인 측면에 더욱 많은 관심을 받으며 활발히 연구될 것으로 예상된다.

가오리는 생체 모방형 수중로봇으로 큰 관심을 받고 있다. 거대한 가슴지느러미를 이용하여 유영하는 가오리는 기동성, 효율성, 소음적 측면에서 우수한 장점을 가지고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 가오리 날개의 움직임에 따라 굽이치는 형태(undulation)와 진동하는 형태(oscillation)로 구분할 수 있다. 또한 진동하는 형태는 날개의 움직이는 방향에 따라 젓는 형태(rowing)와 펄럭이는 형태(flapping)로 구분한다. 젓는 형태의 움직임은 날개가 몸체 길이 방향으로 움직이는 것이 특징이며 낮은 속도에서 효율적이다. 반면 펄럭이는 형태의 움직임은 날개가 몸체 길이 방향의 수직방향으로 움직이며 고속에서 더욱 효율적이다<sup>(2)</sup>. 진동하거나 펄럭이는 날개 형태의 가오리는 Fig. 1 과 같이 쥐가오리(manta ray)와 소코가오리(cownose ray)가 대표적이다.

Rosenberger<sup>(3)</sup>는 굽이치는 형태와 진동하는 형태 8 종류의 가오리를 이용, 주요 움직임에 따라 날개의 진동수, 날개 주기에 따른 이동거리 등의 동역학적 특성을 분석하였다. 소코가오리의 경우 날개의 진동수는 거의 1.0Hz 로 일정 하였으며, 한 주기당 이동거리는 몸체길이의 약 2 배였다. Clark<sup>(4)</sup>는 간단한 가오리 날개 모델을 만들어 스트로홀 수(Strouhal number)에 따라 추진력을 측정하였으며, 날개 후면에 생성되는 와류 현상을 위상학으로 설명하였다.

본 연구에서는 진동/펄럭이는 형태의 날개를 가진 소코가오리의 동역학적 특성을 파악하고 소코가오리의 날개 형상을 모델링하여 주요 파라미터(날개두께 및 너비)와 진폭, 진동수에 대한 가오리 날개 움직임을 유체-구조 연성기반의 수치적 연구를 수행하고자 한다. 또한 모델링한 날개 형상을 이용하여 진폭 및 진동수의 변화에 따른 날개 모델의 속도 및 이동 거리의 변화를 분석하고자 한다.

## 2. 연구내용 및 방법

### 2.1 지배방정식

가오리 날개의 상하 움직임에 따라 날개 주변

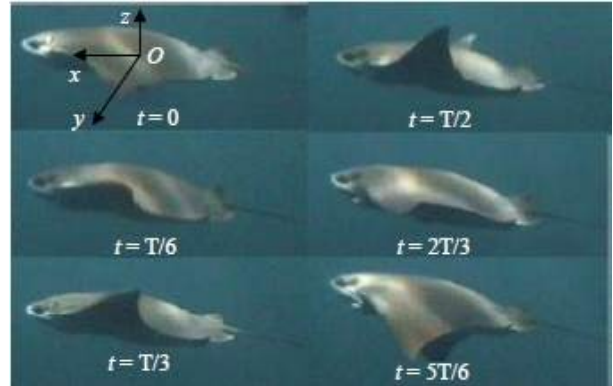


Fig. 1 Steady swimming of cownose ray<sup>(5)</sup>

유체유동 계산 격자의 형태가 변형이 되므로 격자의 형태가 심하게 변형되면 그 순간 다시 격자를 생성시키는 적응 형 격자망을 사용하였다. 본 연구에서는 가오리 날개의 움직임에 따른 유체 유동을 계산하기 위해 연속방정식, 에너지방정식, 운동량방정식을 사용하였다. 단, 열변화에 관한 효과는 무시하였다.

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial\rho}{\partial t} + c \cdot \nabla\rho = -\rho\nabla \cdot u \quad (1)$$

$$\rho \frac{du}{dt} = \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + (c \cdot \nabla)u \right) = \nabla \cdot \tau + \rho b \quad (2)$$

$$\rho \frac{dE}{dt} = \rho \left( \frac{\partial E}{\partial t} + c \cdot \nabla E \right) = \nabla \cdot (\tau \cdot u) + u \cdot \rho b \quad (3)$$

$$\text{여기서, } E = \frac{1}{2} u \cdot u + e,$$

$\tau = (-p + \lambda \nabla \cdot u)I + 2\mu e_u$  이며  $c$  는 실제속도와 격자속도간의 차이이다. 운동학 및 역학적 조건에 따라 유체-고체 경계 면에서의 유체와 고체의 변위 및 압력은 같으므로 다음과 같이 표현할 수 있다.<sup>(6)</sup>

$$d_f = d_s \quad (\text{운동학적 조건}) \quad (4)$$

$$n \cdot \tau_f = n \cdot \tau_s \quad (\text{역학적 조건}) \quad (5)$$

만약 경계 면에서 미끄러짐이 없는 조건이 적용 되면 경계 면에서 유체의 속도는 다음과 같이 표현 된다.

$$u = \frac{\partial d_s}{\partial t} \quad (6)$$

먼저 유체역학 방정식 식 (1), (2), (3)을 풀어 유체영역에서의 속도, 압력 등을 구한 다음, 유체역학적 방정식부터 계산된 값들과 경계조건을 사용하여 구조역학 방정식을 푼다. 또한 고체영역에서

날개의 변위에 따른 각 절점에서의 변화와 운동, 역학적 조건 식 (4), (5)에 맞게 경계 면을 계산한다. 이와 같은 과정을 매 시간 간격 마다 수렴조건에 맞게 반복 계산함으로써 유체 및 고체에서의 거동을 해석할 수 있다.

2.2 주요치수 및 물성 데이터

어린 쥐가오리의 주요 치수와 유행하는 메커니즘은 Fig. 2 의 소코가오리와 거의 일치 한다. 본 논문은 실제 어린 쥐가오리의 주요 치수 및 단층촬영 결과를 토대로 Rosenberger<sup>(3)</sup>의 데이터를 사용하였다. 주요부분에 대한 단층촬영 결과 항공기 날개 플린 NACA0020, NACA0015, NACA0010 의

Table 1 Dimension of cownose ray

Species	Length (cm)	Span (cm)
Rhinoptera bonasus (cownose ray)	28.7±2.0	46.4±2.6

Table 2 Properties of fin structure

Material / Variable	Frame (Hard Lubber)	Fin (PVC flexible grade)
Young's Modulus	23E+9 GPa	0.011E+9 Gpa
Density	1100 kg/m3	1110 kg/m <sup>3</sup>
Poisson's Ratio	0.4	0.4

Table 3 Properties of Fluid

Material / Variable	Sea Water
Temperature	13°C
Density	1026 kg/m <sup>3</sup>
Bulk Modulus	2.28E+9 GPa
Viscosity	0.001 kg/ms

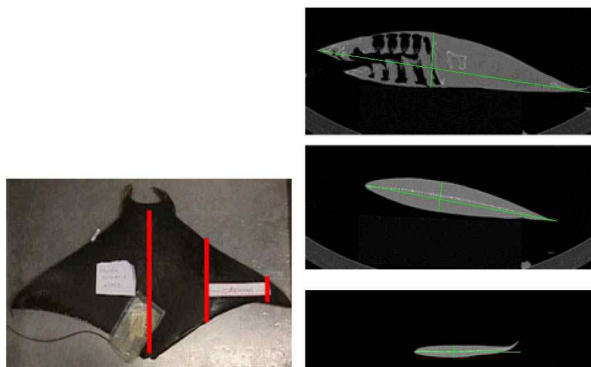


Fig. 2 Photo of a juvenile manta ray and cross-sections at the locations shown in the plan-form<sup>(4)</sup>

단면과 유사하여 이를 모델링에 사용하였다. 소코가오리의 주요치수는 Table 1 에, 유체-구조연성 (FSI) 해석을 위한 고체, 유체부분에 대한 물성 데이터는 각각, Table 2 및 Table 3 에 표시하였다.

2.3 모델링 및 FSI 해석

한쪽 날개의 너비는 날개 전체 너비의 0.35 배이고, 지느러미 길이는 너비와 같은 크기로, 두께는 몸통 두께의 20%로 설정하였으며 이를 Fig. 3 에 나타내었다. 날개의 형태는 실제 가오리 날개의 대표 점을 잡아 최소자승법을 이용하여 9 차 방정식으로 모델링하였다. 또한, 각 주요 지점의 두께에 대하여 날개 플 모델을 고려하여 로프팅하였으며 이를 Fig. 4 에 나타내었다. FSI 해석은 먼저 모델링한 지느러미에 대해 비정렬 테트라 격자를 사용하여 격자생성을 수행한 후 지느러미의 표면에 유체-고체 경계조건을 설정하였다. 같은 방법으로 유체의 경우 고체부분(날개 전체)을 배제한 유체영역을 설정, 유체-고체 경계조건을 설정하였다. 이 유체-고체 경계 면에서의 격자상태를 살펴보면 Fig. 5 와 같다. 경계조건이 완성되면 그 후 Arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE)수식화 과정에 따라 유체-구조 연성의 지배방정식에 의한 해석과정을 수행한다.

3. 수치해석 결과

3.1 실제가오리의 움직임

기존 연구에 의하면 가오리의 진행 속도에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 날개의 변위 및 진동수이다.<sup>(7)</sup> 본 연구에서는 먼저 실제 가오리 날개 변

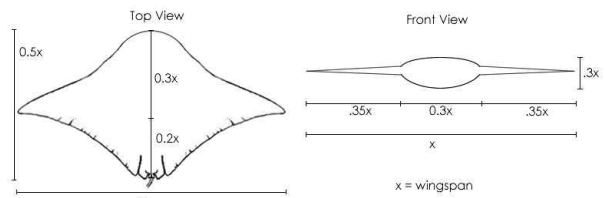


Fig. 3 Body ratio of cownose ray<sup>(5)</sup>

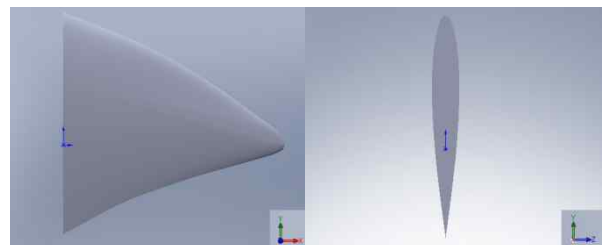


Fig. 4 CAD model of ray fin

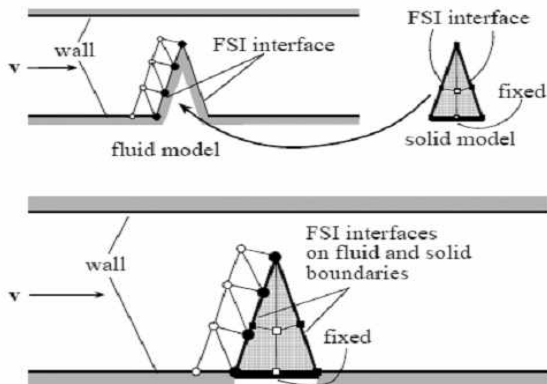


Fig. 5 FSI interface between solid & fluid nodes<sup>(8)</sup>

위 및 진동수와 같은 수치로 해석을 하여 실제 가오리와 비교하여 보았다. 수치해석의 방법은 날개의 뼈대에 변위를 설정하여 날개 끝 부분의 변위를 조절하였으며, 시간 당 변위에 변화를 주어 진동수를 설정하였다. 또한 날개 모델의 이동은 길이 방향으로만 자유도를 지정하여 날개의 진행 속도 및 이동거리를 해석하였다. 유체는 정지 상태에서 해석하였으며 중력 및 와류의 영향은 무시하였다. 해석은 상용프로그램인 ADINA 8.5.3<sup>(8)</sup>을 사용하였다. 실제 가오리와 같은 조건하에 Fig. 6의 비정렬 테트라 격자를 바탕으로 5 주기까지의 해석결과를 Fig. 7에 나타내었다. 이때 해석영역(control volume)은 날개길이의 7 배로 하였다. 실제 가오리는 날개 짓 한 주기 당 몸체 길이의 약 2 배(0.6m)의 이동 거리를 보인다. 해석 결과 정지 상태에서 1 주기까지는 0.4m의 이동 거리를 보였으며, 등속도 운동이 시작되는 1 주기에서 2 주기까지의 결과는 0.556m로 실제 가오리의 이동 거리에 90%의 값을 얻을 수 있었다. 즉, 실제 가오리와 같은 조건하에 수치해석 결과 90%의 추진력을 갖는 모델을 만들 수 있었다. 1 주기까지의 평균 속도는 0.2m/s, 1 주기에서 2 주기까지의 평균 속도는 0.278m/s이다. 한 날개 짓 한 주기 당 2 번의 속도 변화가 나타나는 것을 Fig. 8을 통해 알 수 있다. 이는 날개 끝이 최상 및 최하 지점에서 운동방향의 변화에 따른 속도 감소로 인한 것이고 날개가 몸체와 수평일 때는 날개 움직임의 속도가 최상이므로 최대의 추진력을 얻을 수 있었다. 이러한 사실을 바탕으로 날개의 회전속도 또한 날개모델이 추진력을 얻을 수 있는 다른 조건임을 알 수 있다.

3.2 날개변위에 따른 이동거리 및 진행속도

날개의 변위는 6 단계로 나누었다. 날개 모델 너비의 0.28, 0.27, 0.40, 0.52, 0.63, 0.75 배로 설정하였

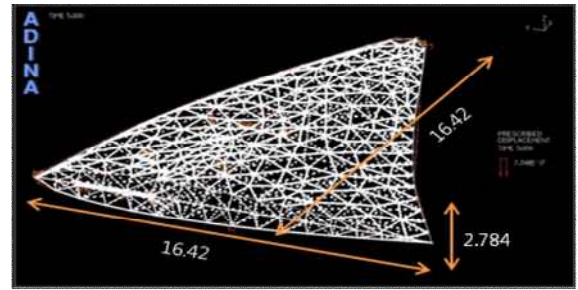


Fig. 6 Mesh generation

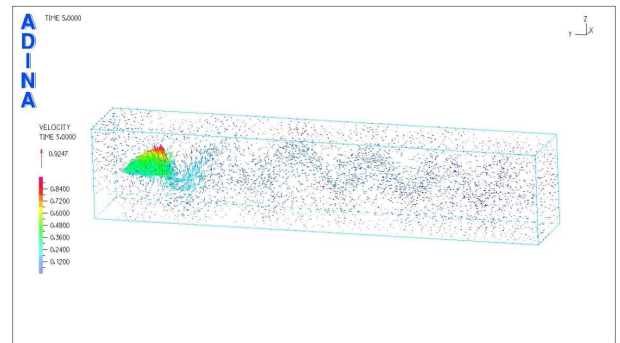


Fig. 7 Velocity profile

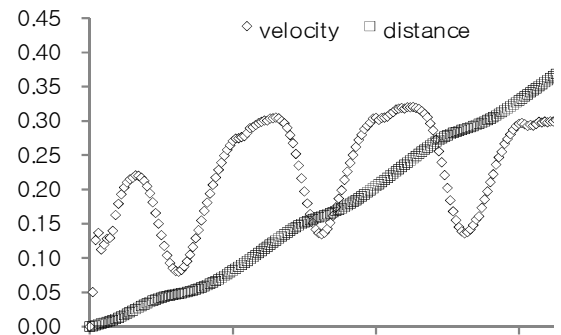


Fig. 8 Actual cownose ray fin motion

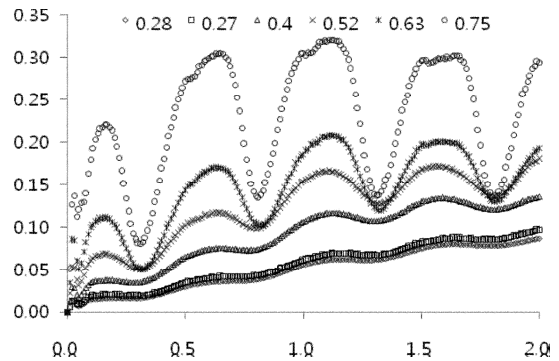


Fig. 9 Velocity at 0.28-0.75 half span

다. 이는 날개의 뼈대에 일정하게 변위 차를 지정하여 날개 끝부분의 변위를 확인하였다. 날개 모델 너비의 0.75 배는 실제 가오리의 치수와 같은

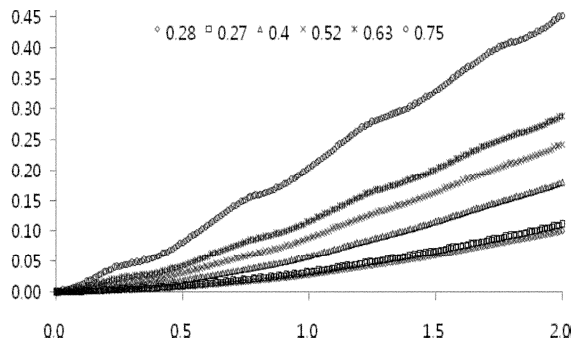


Fig. 10 Distance at 0.28~0.75 half span

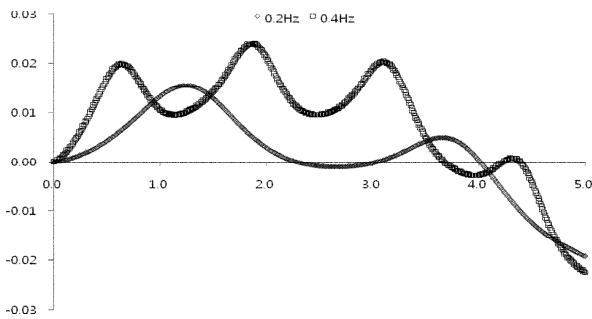


Fig. 11 Distance at frequencies 0.2Hz and 0.4 Hz

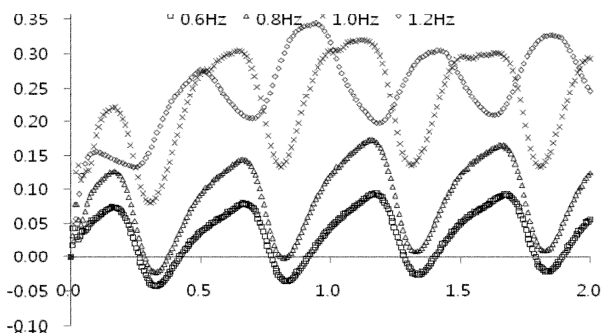


Fig. 12 Velocity at frequencies 0.6Hz ~ 1.2Hz

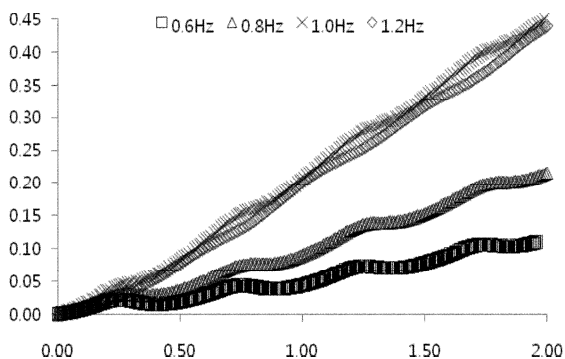


Fig. 13 Distance at frequencies 0.6Hz ~ 1.2Hz

모델이다. 날개 모델을 유연하게 묘사하여 날개 끝 부분에서 첫 번째와 두 번째 단계의 변위는 거의 차이가 없었고 오히려 두 번째 단계가 첫 번째 단계보다 변위가 더 작았지만 뼈대의 변위가 큰 두 번째 단계에서 더 큰 진행속도 및 이동거리의 차이를 확인할 수 있었다. 날개의 변위가 커짐에 따라 날개 모델의 추진력이 일정하게 커지다가 0.75 배의 변위를 주었을 때 진행속도와 이동거리가 확연히 커지는 것을 Fig. 9 및 Fig. 10 을 통해 각각 확인할 수 있었다. 또한 변위가 커짐에 따라 날개 모델의 속도 변화 역시 크게 변하였다. 즉, 실제 가오리가 움직일 때 가지는 날개의 변위와 진동수로 움직일 때 가장 큰 결과 값을 얻을 수 있었다.

### 3.3 날개진동수에 따른 이동거리 및 진행속도

날개 모델의 진동수는 0.2 ~ 1.2Hz 까지 6 단계로 나누었다. 2 주기까지 해석을 하여 진행속도 및 이동거리를 확인하였다. 진동수 값이 0.2Hz, 0.4Hz의 경우 제자리에서 날개 짓을 하다가 후진하는 것을 Fig. 11 을 통해 확인할 수 있다. 즉, 유연한 날개 모델이 추진하기에 충분한 날개 회전 속도를 얻지 못하였다. 진동수에 따른 날개 모델의 해석 결과 진동수가 증가함에 이동 속도 역시 증가하였다. 또한 실제 가오리 날개 진동수인 1.0Hz 에서 확연히 증가하였다. 한편 이동속도는 1.0Hz 까지는 날개의 진동에 따라 일정하게 증감하였으나 1.2Hz 에서는 상대적으로 속도 변화의 주기성이 떨어졌다 (Fig. 12 참조). 그 결과 Fig. 13 의 이동거리 그래프에서 보면 1.2Hz 일 때 보다 1.0Hz 일 때 2 주기 동안 더 먼 거리를 유명하였다. 또한 날개 모델 진폭 변화 량에 따른 속도 및 이동거리 해석과 같이 실제 가오리와 같은 1.0Hz 에서 속도 및 이동거리가 가장 큰 결과를 얻을 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구에서는 진동/떨어지는 가오리에 대한 동역학적 특성을 파악하고 이를 유체-구조 연성기법을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 날개의 진폭, 진동수에 따라 날개 모델의 속도 및 이동거리를 분석하였다. 실제 가오리 날개의 변위 및 진동수를 이용하여 해석한 결과, 90% 정도의 속도 및 이동거리를 구할 수 있었다. 또한 동일한 날개 모델을 이용하여 변위 및 진동수에 따른 속도와 이동거리를 해석한 결과 실제 가오리의 동역학적 특성에서 가장 우수한 속도 및 이동거리를 구할 수

있었다. 이러한 결과를 바탕으로 가오리 날개 모델의 추진력에 있어서 날개의 변위, 진동수가 중요한 요소임을 알 수 있었다. 또한 속도의 주기성, 날개의 회전 속도 역시 추진력에 작용하는 주요 요소임을 예측할 수 있다. 날개의 회전 속도를 조절하여 날개 모델 진행 속도의 최대 및 최소 값을 줄인다면 더 큰 추진력을 얻을 수 있을 것이다. 또한 향후 본 논문의 결과를 바탕으로 가오리 날개의 주요 움직임(진동수, 진폭), 파라미터(너비, 두께)의 변화에 따른 날개의 추진에 대한 최적화된 형태의 날개 모델을 만들 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- (1) Heine, C., 1992, "Mechanics of Flapping Fin Locomotion in the Cownose Ray, *Rhinoptera Bonasus* (Dlasmobranchii: Myliobatidae)," Ph.D. Thesis, Duke University.
- (2) Blake, R. W., 1979, "The Swimming of the Mandarin Fish *Synchropus Picturatus* (Callionyiidae: Teleostei)," *Journal of the Marine Biological Association*, 59, pp. 421~428.
- (3) Rosenberger, L. J., 2001, "Pectoral Fin Locomotion in Batoid Fishes: Undulation Versus Oscillation," *The Journal of Experimental Biology*, 204, pp. 379~394.
- (4) Clark, R. P. and Smits A. J., 2006, "Thrust Production and Wake Structure of a Batoid-Inspired Oscillating Fin," *Journal of Fluid Mechanics*, 562, 415~429
- (5) Theo, P. L. Brower, 2006, Design of a Manta Ray Inspired Underwater Propulsive Mechanism for Long range, Low Power Operation, Ms.D. Thesis, Tufts University.
- (6) Yang, S. B., Qiu J., Han X. Y., 2009, "Kinematics Modeling and Experiments of Pectoral Oscillation Propulsion Robotic Fish," *Journal of Bionic Engineering*, 6, pp. 174~179.
- (7) Zhang, H., and Bathe, K. J., 2001, "Direct and Iterative Computing of Fluid Flows Fully Coupled with Structures," *Computational Fluid and Solid Mechanics*, K. J. Bathe, Editor, Elsevier Science.
- (8) ADINA R&D, Inc., 2008, Theory and Modeling Guide Volume III: ADINA CFD & FSI, A User's Manual.