한국군사과학기술학회지 제12권 제6호, pp. 796~807, 2009년 12월

학술논문 유체공학 부문

수중동물의 헤엄침 성능과 형태학적 적응

Swimming Performance of Aquatic-animals and Their Morphological Adaptation

손 명 환* 이 승 희** 한 철 희***
Myong Hwan Sohn Seung Hee Lee Cheol-Heui Han

Abstract

The swimming abilities of aquatic-animals are of vital importance to their ecology. The relationship between outer shapes and the swimming ability has been focused just a few centuries ago by engineering community. Present paper surveys the recent studies of the aquatic-animals' swimming performance in the morphological point of view. Also an experimental study is performed in order to investigate the effect of the tail fin's shape on the propulsive performance. The result showed that the morphological study provided valuable data for exploring the secrets of the aquatic-animals' swimming performance.

Keywords : Aquatic-Animals(수중 동물), Swimming Performance(헤엄침 성능), Morphology(형태), Literature Survey(문헌 연구), Experimental Study(실험 연구), Undulating Motion(굽이침 운동), Thrust Measurement(추력 측정), PIV Wake Analysis(PIV 후류 해석)

1. 서 론

순항속도, 순간기동능력 등과 같은 수중동물의 헤엄침 성능은 이들의 먹이 획득 방법, 적으로부터의 생존, 회유(migration) 등과 같은 생태의 모든 면에 영향을 미치는 요소이다. 따라서 수중동물의 몸체 형태와 구조는 이들이 살아가는 생태에 가장 적합한 헤엄침 능력을 가질 수 있도록 적응(adaptation)되어졌다고 추론할 수 있다. 태생학적으로 뿌리가 매우 다른 참치나 상어와 같은 물고기와 포유류인 고래는 놀랍도록 유사한 형태의 초생달형(lunate or crescent) 꼬리지느러미(caudal fin) 혹은 꼬리(fluke)를 갖고 있는 것이다. 지금까지의 연구결과로는 초생달형 꼬리지느러미는 지느러미의 윗부분과 아랫부분 사이의 가운데 공간을 비우고 후퇴각이 작은 초생달 모양을 취함으로써 지느러미의 표면적은 작게 하되 와류 발생 유효면적은 감소시키지 않아 고속 순항에서 매우 효율적으로 추진력을 발생시킬 수 있다고 알려져 있다.

물고기를 주로 하는 수중동물의 뛰어난 헤엄침 능력은 오랜 기간 동안 인간의 탐구대상이 되어 왔지만 수리학적 법칙과 계량에 근거한 연구는 지난 한 두 세기의 일이다[1]. 동물은 살아가는 환경에 대한 적응

† 2009년 7월 29일 접수~2009년 11월 6일 게재승인
* 포항공과대학교 기계공학과
** 한양대학교 기계공학과
*** 국립 충주대학교 항공·기계설계학과
책임저자 : 손명환(myongsohn@postech.ac.kr)

능력을 갖는 특징이 있으므로, 수중동물 또한 수십만 혹은 수백만 년을 살아오면서 가장 적합한 몸의 형태와 운동방식을 갖도록 하였을 것으로 자연학자들은 보고 있다. 따라서 수중동물의 몸체 형태와 헤엄침 성능과의 관계를 규명하는 연구는 수중동물의 헤엄침 능력에 대한 비밀을 푸는데 매우 유용한 방법 중 하나이다. 본 논문은 이와 같은 관점에서 수중동물의 헤엄침 성능과 형태적인 특징과의 관계를 찾는 연구에 대한 자료를 제시하고자 한다.

2. 헤엄침 성능에 대한 형태학적 관점에서의 문헌 조사 연구

Fig. 1은 Azuma[2]가 작성한 부채운동(fanning motion)에 의해 운동을 하는 물고기를 형태특성에 따라 분류한 도표의 일부분이다. Fig. 1(a)에 묶은 물고기들은 위아래로 납작한 몸통, 커다란 등지느러미와 배지느러미, 넓은 면적을 갖는 삼각형 꼬리지느러미로 그 형태가 특징지어지는데, 이들은 높은 기동성능(high maneuverability)과 정지 상태에서 빠르게 돌진할 수 있는 능력(rapid dash from rest)을 운동성능으로 갖고 있다. Fig. 1(b)에 묶은 물고기들은 커다란 면적 혹은 확장된 스팬을 갖는 등지느러미, 기다란 가슴지느러미 쌍, 커다란 가로세로비(aspect ratio)를 갖는 초생달형 꼬리지느러미로 형태가 특징지어진다. 이들 물고기는 매우 큰 순항속도를 갖고 있으나 돌진 능력은 뛰어나지 못하다. Fig. 1의 예는 물고기의 몸의 형태와 운동능력이 밀접하게 관련되어 있음을 직관적으로 보여주고 있다. 이들 서로 다른 그룹에 속하는 물고기의 서식지, 먹이 획득 방법, 회유가 다름은 물론이다.

Webb[3]은 운동능력 특성에 따른 물고기를 3개의 특별성능 그룹과 대부분의 일반 성능 그룹으로 구분하였는데, 일반 성능 그룹은 salmonids, surfperches, sculpins, bluegill 등과 같이 모든 분야의 운동성능을 어느 정도까지 골고루 갖고 있는 물고기로 분류하였다. 3개의 특별성능이 뛰어난 그룹은 가속(acceleration)이 뛰어난 그룹(pikes, barracudas, pipefishes 등), 순항(cruise)이 뛰어난 그룹(mackerel and tuna, pelagic sharks 등), 기동(maneuver)이 뛰어난 그룹(butterflyfish, coral reef and weedy-river fishes 등)이다. Videler[4]는 이를 보다 세분하여 다음과 같은 11개의 특별그룹을 제시하고 있다.

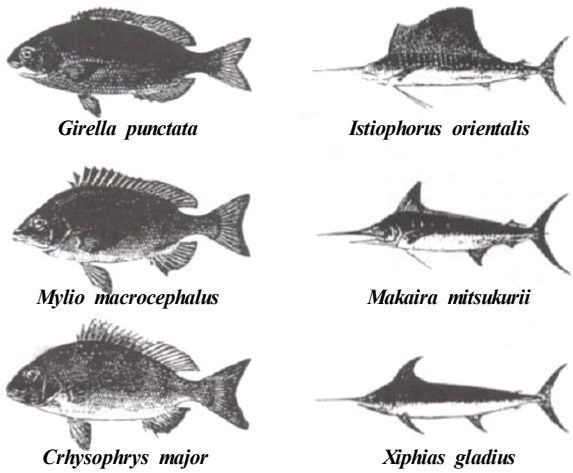


Fig. 1. 물고기의 운동성능과 형태와의 관계 예[2]

- specialist for accelerating; pike, barracuda 등
- cruising specialist; scombridae, pelagic sharks 등
- maneuvering experts; angelfish, butterflyfish 등
- economic swimmers; sunfish, opah, louvar 등
- fish adapted to reach the highest speeds; swordfish, billfish 등
- fish built to use ground effects; flatfish, ray 등
- experts in forward and backward swimming in mud and maze-type environments; moray, eel 등
- sandswimmers; rainbow wrasse, sandeel 등
- hovering fish; seahorse
- flying fish; Atlantic flying-fish, hatchet fish 등
- recoil reducers; cornet fish

Fig. 2에 이들 11개 그룹 중 'specialist for accelerating', 'cruising specialist', 'economic swimmers', 'fish adapted to reach the highest speeds' 등 4개 그룹에 속하는 물고기의 형태를 제시하였다. 'Cruising specialist'에 속하는 Blue-fin tunny(*Thunnus thynnus*)와 Probeagle(*Laanma nanus*) 극단의 유선형 몸통, 가느다란 꼬리자루(caudal peduncle), 가로세로비가 큰 꼬리지느러미 등을 특징적인 몸 형태로 갖고 있으며 이들은 제법 큰 속도로 매우 먼 거리를 계속적으로 헤엄치는 능력을 보유하고 있다. 'Fish adapted to reach the highest speeds'에 속하는 swordfish는 최고속도가 100 km/hr에 달하며, 옆으로 납작한 꼬리자루와 함께 매우

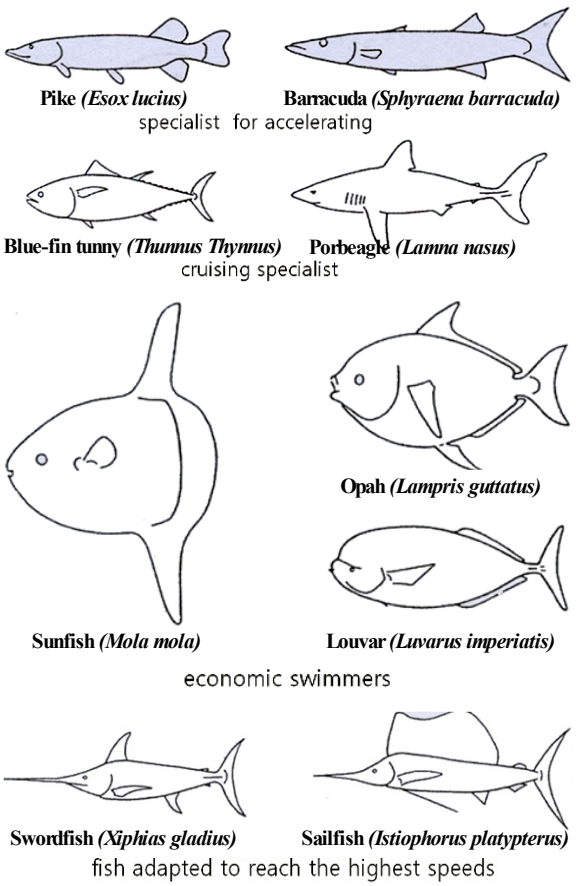


Fig. 2. 특별한 운동성능을 갖는 물고기 그룹의 예[4]

큰 가로세로비와 앞전 후퇴각이 있는 꼬리지느러미를 형태적인 특징으로 갖고 있다. 수중동물의 헤엄침 성능과 형태학적 특징을 보다 계량적으로 규명하는 연구도 이루어지고 있다. 이들 계량적 연구는 형태적 특징을 몇 개의 변수와 변수의 조합으로 나타내고 이들 변수 혹은 변수의 조합과 순항, 기동, 가속 등과 같은 운동성능 간에 상관관계를 수식과 도표로 나타내는 방법으로 수행된다. 예를 들면 Fisher와 Hogan[5]는 열대 산호초(coral reef)에 집단 서식하는 어린 물고기 100종에 대하여 14개의 형태학적 변수와 변수의 조합을 정의하고 이들과 헤엄침 속도의 관계식을 찾는 연구를 수행하였다. 이와 같은 연구의 결과는 운동성능이 관찰되지 않은 미지의 대상 물고기에 대하여 그 형태학적 특징을 보고 운동성능을 예측할 수 있게 하므로 매우 가치 있는 자료가 된다. Table 1과 Fig. 3에 Fisher와 Hogan이 사용한 형태학적 변수와 변수의 조

Table 1. 물고기의 형태학적 변수 및 변수 조합

	Variable	symbol and definition
morphological variables	total length	TL
	body depth	BD
	body width	BW
	body area	BA
	propulsive area	PA
	muscle area	MA
	caudal peduncle depth	CPD
	caudal fin height	CFD
	caudal fin area	CFA
morphological ratios	muscle ratio	MR = MA/BA
	propulsive ratio	PR = PA/BA
	fineness ratio	FR = TL/[(BW +BD)/2]
	aspect ratio	AR = $CFD/CFA^{0.5}$
	caudal peduncle depth factor	CPDF = CPD/BD

합을 제시하였다.

Fig. 4는 Fisher와 Hogan의 연구결과의 유용성을 보여주는 예로 몸의 형태 변수를 사용하여 예측한 헤엄침 속도와 관측한 헤엄침 속도와의 상관도가 매우 높은 것을 보여주고 있다. Fig. 4에서 문자 symbol은 각각의 물고기 이름의 약자이며, 헤엄침 속도 예측에 사용한 공식은 다음과 같다.

$$U_{crit} = 17.9(\log TL) + 42.9AR - 30.8CPDF^2 - 66.1$$

이식에서 TL은 total length, AR은 aspect ratio, CPDF는 caudal peduncle depth factor이다. AR은 물고기의 헤엄침 속도에 가장 큰 영향을 미치는 요소로 어떠한 변수로 구성된 회귀(regression) 모델에서도 포함됨을 Fisher와 Hogan은 발견하였다. 커다란 순항속도를 가지고 넓은 대양을 오가며 섭생을 하는 해양 물고기의 거의 대분이 높은 AR값을 갖는 꼬리지느러미(초생달 형태와 같이 면적에 비하여 스팬이 매우 큰 꼬리지느

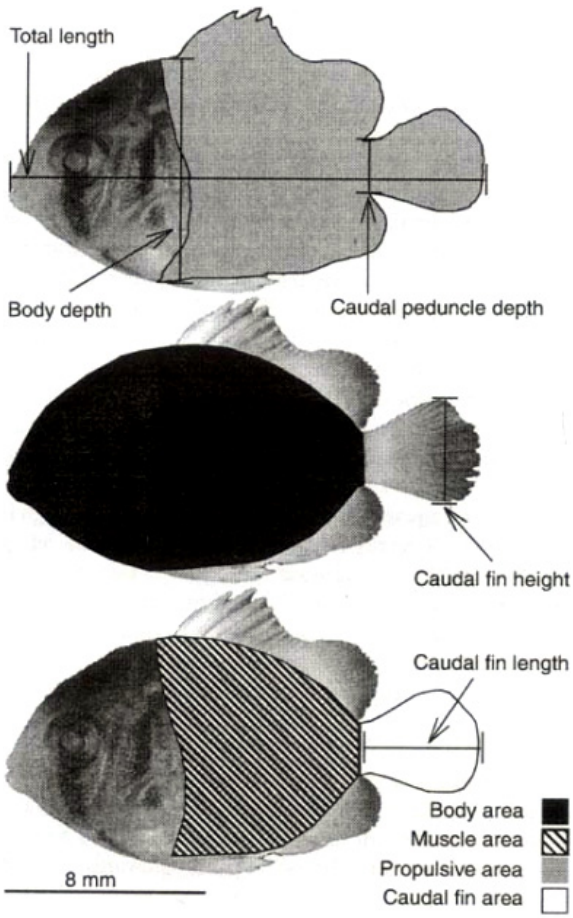


Fig. 3. 형태학적 변수의 정의[5]

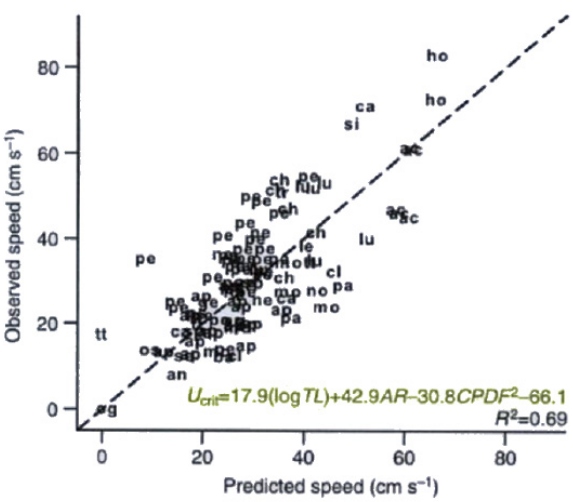


Fig. 4. 순항속도에 대한 예측과 관측 비교[5]

러미)를 가장 큰 형태적 특징으로 하고 있다는 것을 확인해주고 있다. CPDF 또한 헤엄침 속도에 큰 영향을 미치는 요소로 CPDF 값이 큰(caudal peduncle depth가 몸통의 depth에 비하여 큰) 물고기는 갑자기 돌진하여 먹이를 잡아먹는 물고기로 가속성능(acceleration performance)이 우수하나, 지속적인 순항능력은 떨어진다. 한편 CPDF 값이 작은(좁은 caudal peduncle을 갖는) 물고기는 높은 속도로 지속적인 순항을 하는 능력이 뛰어나다. Fisher와 Hogan은 종류가 다양하고 넓은 폭으로 분포한 몸체의 형태를 갖는 표본임에도 불구하고 TL, AR, CPDF 등 3가지의 변수가 순항속도 변화의 70%를 설명할 수 있음을 제시하고 있다.

Webb[6]은 생체 송어의 등지느러미, 배지느러미, 꼬리지느러미 등과 같은 median-fin을 서로 다른 조합으로 자르고 각각의 형태에서 이들이 갖는 헤엄침 성능을 비교하는 연구를 수행하였다. Webb의 연구결과는 fin ray를 절단하였을 때 빠른 출발 능력(fast-start performance)이 나빠지는 정도는 pelvic rays, dorsal fin, anal fin, dorsal lobe of caudal fin and ventral lobes of caudal fin, ventral lobe of caudal fin and anal fin, dorsal and ventral lobes of caudal fin, both caudal-fin lobes anal fin의 순서임을 보여주었다. 이와 같은 연구결과에 기초하여 물고기의 빠른 출발 성능(fast start performance)과 순항(cruise)이나 돌진(sprint)과 같은 정상 성능(steady performance)을 위한 횡 방향 몸체 형상(lateral body profile)은 서로 배타적(mutually exclusive)이라고 결론지었다.

Tong 등[7]은 보다 근본적인 관점에서 물고기의 추진 능력과 형태학적 적응을 연구하였는데, 3차원 선형 및 2차원 비선형 waving-plate 이론을 사용하여 단순화된 3가지 유형의 꼬리지느러미 형태에 대하여 추력계수와 추진효율 등과 같은 헤엄침 성능을 계산하였다. Tong등은 anguilliform 모드의 추진, carangiform 모드의 추진, 3가지 꼬리지느러미의 형태에 따른 헤엄침 성능과 형태변화의 관계를 규명하였지만, 사용한 해석적 방법과 형상의 단순화로 인하여 연구결과는 매우 제한적이다. Tong등의 연구는 보다 현실적인 몸체 형상에 대하여 보다 향상된 해석방법을 사용하여 헤엄침 성능과 형상의 적응 관계를 찾는 연구가 계속되어야 함을 시사해준다.

Bandyopadhyay 등[8]은 28개 종류 물고기에 대하여 지느러미의 크기 척도(length scale)와 기동능력과의 관계를 조사하여 low speed highly maneuverable, high speed

poorly maneuverable, high speed highly maneuverable의 3가지로 분류하였다(Fig. 5). Bandyopadhyay등은 나아가 이들 관찰로부터 얻어진 지식에 바탕하여 로봇 물고기를 만들고 이들 로봇 물고기가 갖는 기동능력과 생체 물고기가 갖는 기동능력의 차이가 어떠한지를 찾는 연구를 수행하여, 수중동물의 헤엄침에서 정제된 지식을 사람이 만든 수중 운행체에 적용하려는 시도를 하였다.

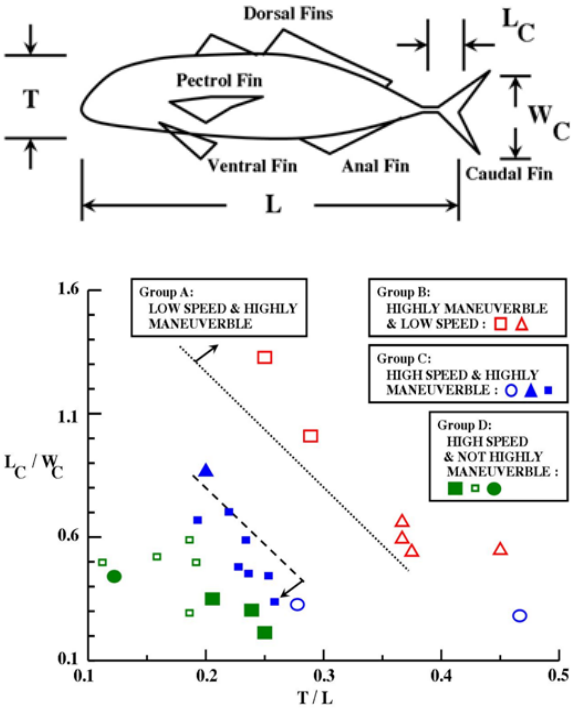


Fig. 5. Relation between the swimming characteristics and the body shape[8]

Fish[9]는 다양한 형상의 생체 고래 류를 대상으로 이들의 헤엄침 능력과 형태의 관계를 찾는 연구를 수행하였다. 대상으로 한 고래 류는 beluga whale (*Delphinapterus leucas*), killer whale(*Orcinus orca*), false killer whale(*Pseudorca crassidens*) bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*)이며, 헤엄침 능력은 Orlando의 Sea World 수족관에서 측정하였다. 헤엄침은 비디오를 사용하여 순항속도, 꼬리(fluke)의 beating frequency와 amplitude를 측정하였고, 몸체 형태 변수는 몸무게, 몸체 길이 및 지름, 날씬비(지름/길이), 꼬리의 스팬 및 코드 길이, 꼬리의 평면적, 꼬리의 가로세로비와 후퇴각 등이다. Fish는 꼬리의 beating frequency, beating amplitude, pitch angle, feathering angle이 헤엄침 속도에 미치는 자료를 산출하였다. 또한 헤엄침 속도와 추진동력, 헤엄침 속도와 추진효율, pitch angle과 추진효율과의 관계에 대한 자료도 제시하였다. Fig. 6은 꼬리의 beating frequency와 헤엄침 속도와의 관계를 보여준다.

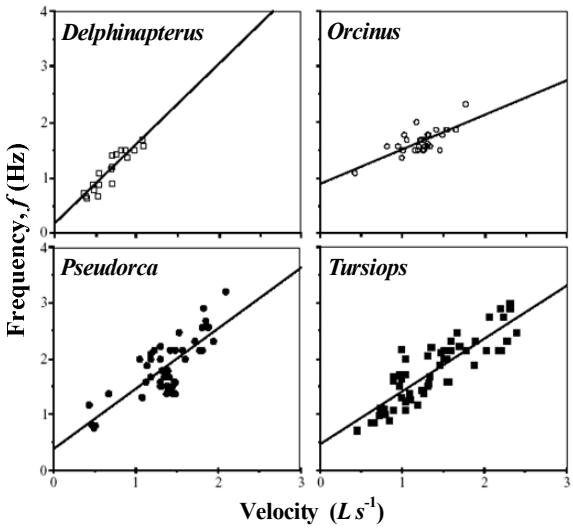
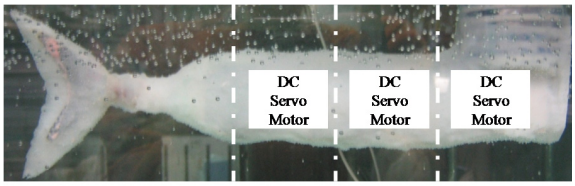
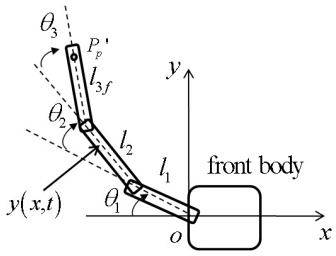


Fig. 6. Tail-beat frequency와 length-specific swimming velocity와의 관계[9]

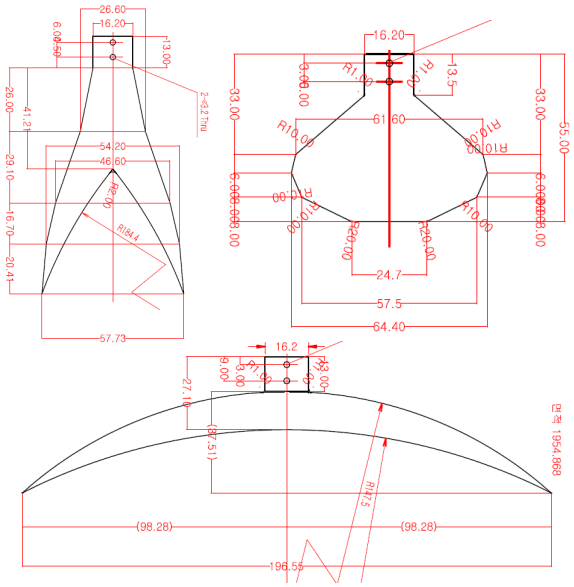
3. 헤엄침 성능에 대한 형태학적 관점에서의 실험 연구

Fig. 7과 같은 고등어(Mackerel) 모사 로봇을 제작하여 수조실험을 수행했다. 본 연구에서는 3개의 서보모터를 사용하여 고등어 꼬리지느러미의 굽이침 운동(undulating motion)을 3개의 링크구조로 모사를 했다(Fig. 7a). 각각의 서보모터는 C++ 언어를 사용하여 제어되도록 하였으며, 6축의 Force/Torque 센서를 동적시험모델을 지지하는 지지대에 부착하여 DAQ board로부터 원하는 자료를 획득할 수 있도록 계측시스템을 구성하였다. 이때 동일한 꼬리지느러미 면적을 가지도록 설계하였다. 꼬리지느러미의 유연성은 무시하였다. Fig. 7b는 강판으로 제작한 3개의 그룹, 5가지 형태의 꼬리지느러미 모델을 보여주고 있다. Fig. 7b에서 나타나 있듯이 tail 1의 지느러미의 스팬길이는 54mm, 면적은 1950mm^{2}이며 가로세로비는 1.5이다. Tail 2의

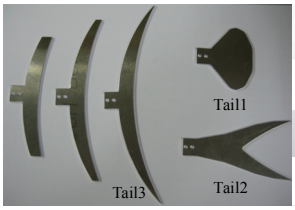




(a) body and three-link system



(b) drawing of caudal fins with same area and different aspect ratios



	Span (mm)	Area (mm^2)	Aspect Ratio
Tail1	54	1950	1.5
Tail2	57.7	1950	1.7
Tail3	196.5	1950	19.8

(c) caudal fin models of same area and different aspect ratios

Fig. 7. Mackerel model for the water tunnel experiment

스팬길이는 57.7mm로 tail 1 보다 큰 젖힘 각 과 테이퍼 비를 가진다. 반면에 tail 3은 tail 1 및 tail 2 지느러미보다 큰 스팬길이와 가로세로비를 가지고 있다. Tail 2의 가로세로비는 1.7이며, tail 3의 가로세로비는 19.8이다.

Fig. 8은 3가지 유형의 꼬리지느러미가 0.17, 0.35, 0.52의 진폭을 가지고 굽이침 운동을 할 때 꼬리지느러미에서 발생하는 추력 값을 나타낸 그림이다. 그림에서 진폭이 클수록 동일한 주파수에서 더욱 큰 추력을 발생시킴을 알 수 있다. Tail 3은 다른 두 꼬리지느러미에 비하여 진폭이 클 경우 오히려 추력을 발생시키고 있다. 또한 진폭이 작을 경우 tail 1이 오히려 tail 2보다 더 큰 추력을 발생시킨다. 이는 복어와 같은 종류의 물고기가 진폭이 작고 빠른 주파수로 꼬리지느러미를 움직일 때는 고등어보다 더욱 큰 추력을 발생시킬 수 있으며, 고등어와 같은 물고기 들은 큰 진폭으로 급출발을 할 경우 타 물고기들 보다 더 큰 추력을 발생시킬 수 있음을 시사해준다.

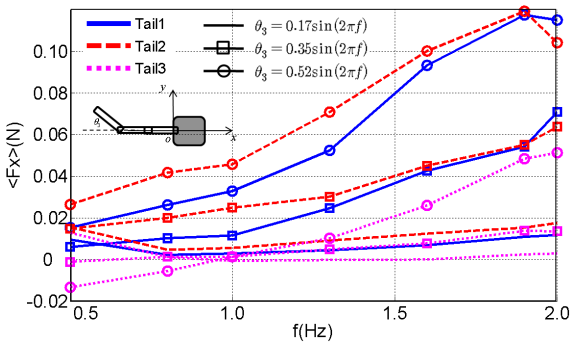


Fig. 8. Effect of amplitude on the thrust generation

Fig. 9는 Fig. 7(c)에 나타낸 3가지 종류의 꼬리지느러미가 다양한 종류의 굽이침 운동을 할 때 꼬리지느러미가 발생시키는 추력변화를 나타낸 그림이다. 실험에서 사용된 모델의 시간과 위치에 따른 운동 변위식은 $y(x,t)=\left(C_1x+C_2x^2\right)\sin(2\pi ft+\phi x)$이다. 여기에서 x는 몸체 축을 따른 좌표이며, y는 횡방향의 변위를 나타낸다. 이 변위 식에서 C_1 과 C_2 값을 변화시키면 다양한 종류의 물고기 등뼈지느러미의 움직임을 구현할 수 있다. 그림에서 실험한 모든 경우에 대하여 tail 1 꼬리지느러미가 다른 꼬리지느러미들에 비하여 더욱 큰 추력을 발생시킴을 알 수 있다. 이는 본 연구에서 수행한 수조실험에서 꼬리지느러미를 둘러싼 유

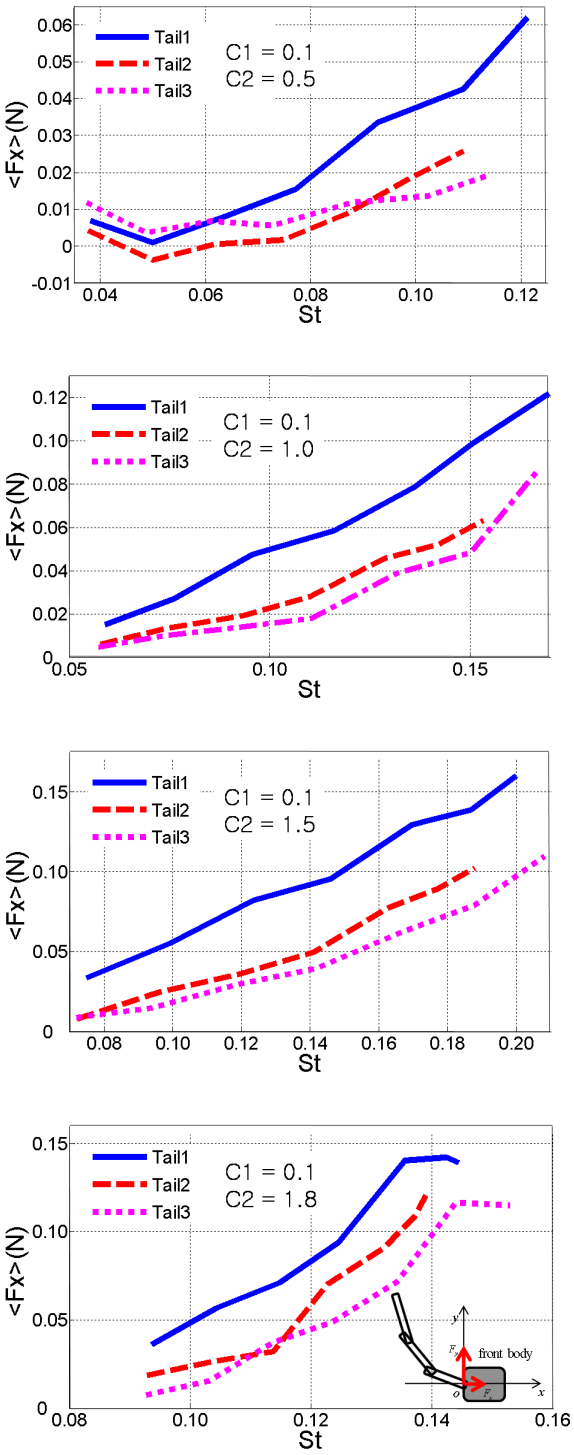


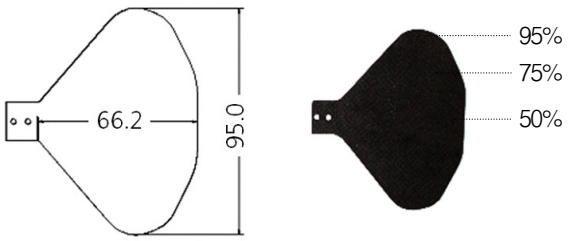
Fig. 9. Effect of undulation parameters on the thrust generation

체는 정지한 상태이기 때문이며 따라서 급기동이 우수한 tail 2나 장거리 이동성능이 우수한 tail 3보다 큰 추력을 발생시키고 있다. Fig. 9의 (a)에서 (d)까지의 결과를 보면 Strouhal수가 증가할수록 추력 또한 선형적으로 증가를 하고 있음을 알 수 있다. 그러나 C_2 값이 일정 값 이하 (0.5)이거나 일정 값 이상 (1.8)인 경우 tail 2 및 tail 3 뿐만 아니라 tail 1도 Strouhal 수의 변화에 따라 추력이 고차함수의 형태로 변화하고 있음을 알 수 있다. 이는 $\left(C_1 x + C_2 x^2\right)$ 가 물고기의 뼈대의 시간에 따른 움직임을 나타내는 프로파일의 envelope를 의미하며, C_1 보다는 C_2의 변화가 함수의 비선형성을 크게 증가시키기 때문인 것으로 판단된다.

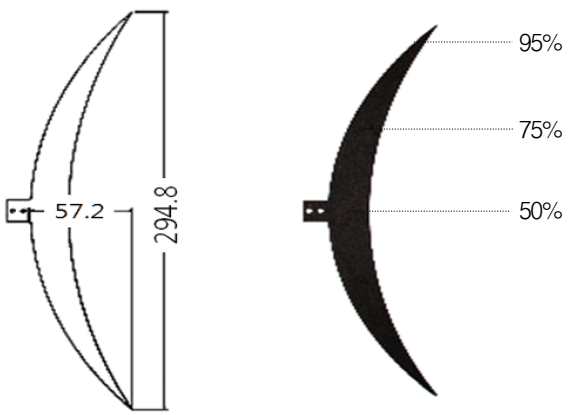
자유면 효과(free-surface effect)를 고려하지 않아도 되는 잠수함과 같은 수중 운행체에 대하여는 풍동실험이 많이 사용되어 왔다[10~12]. 물속에 완전히 잠긴 물체에 대한 유동문제에서는 Froude number(Fr = $V/(gL)^{1/2}$, V; 운행체 속도, g; 중력가속도, L; 운행체 크기)와는 무관하게 레이놀즈수(Reynolds number)만이 유일한 유동의 상사변수(similarity parameter)가되기 때문이다. 한편 풍동은 수중 운행체의 실험 연구에 통상적으로 사용되는 towing tank에 비해 수중 운행체의 실제 레이놀즈수에 매우 근접하는 레이놀즈수를 만들 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 수조실험을 보완하기 위하여 풍동 실험을 통한 PIV 후류 해석 실험을 수행하였다. 사용한 풍동은 폭 1.0m, 높이 1.0m, 길이 2.1m의 측정부 크기를 가지고 있으며, 작동 범위의 풍속은 3m/sec에서 50m/sec이다. 먼저 실험 모델은 운동성능이 가장 대비가 되는 두 가지 형상인 부채(fan) 형태(shape A)와 초생 달(crescent moon) 형태(shape B)의 꼬리지느러미이다. 부채 형태의 꼬리지느러미는 물살이 빠른 환경에서 생활하는 물고기들이 가지는 형상으로 가속 성능이 우수하다. 초생 달 형태의 꼬리지느러미는 상어나 고래 등과 같이 장거리를 헤엄치는 수중동물이 갖는 형태로 순항성능이 우수하다. 모델의 유연성은 고려하지 않았으며, 몸체가 없이 지느러미만 있는 모델이다. 몸체가 있을 경우 몸체의 후류 속에 꼬리지느러미의 일부가 잠기게 되므로 꼬리지느러미의 형태에 따른 후류 특성을 도출하는데 어려움이 따르게 된다.

Fig. 10은 이와 같은 두 가지 실험 모델의 기하학적 제원과 사진이다. 실험 모델은 알루미늄 판으로 제작하였으며, 검은 색 페인트를 도포하여 PIV 측정시에 산란광에 의한 노이즈 시그널이 최소화 되도록 하였

다. 이 두 모델은 평면적은 같으며, 가로세로비(aspect ratio = 꼬리지느러미의 폭^2/꼬리지느러미의 면적)는 서로 다르다(Fig. 11에서 shape B는 상대적으로 축소되어 있음). 부채 형태인 shape A의 면적은 4,442mm^{2}이고, 가로세로비는 2.03(스팬^2/면적 = (95 mm)^2/(4,442mm^2))이다. 초생 달 형태인 shape B의 면적은 4,401mm^{2}이고, 가로세로비는 19.7(스팬^2/면적 = (294.8mm)^2/(4,401 mm^2))이다.



(a) Shape A; fan shape



(b) Shape B; crescent-moon shape

Fig. 10. Wind tunnel models of caudal fins for the PIV measurement of wake

모델은 지지대 풍동 측정부에 수직으로 설치된 지지대에 부착되어 좌우로 30도까지 진동한다. 이때 진동 주기는 15Hz이며 30도에 해당하는 최대진폭은 10 cm이다. 자유류의 속도는 5m/sec로 하여 Strouhal 수가 0.3이 되도록 하였다(St = 주기×진폭/자유류 속도 = (15sec^{-1})×(0.1m)/(5m · sec^{-1}) = 0.3)). 꼬리지느러미의 길이(60cm)와 자유류(free stream) 속도에 기준한 레이놀즈 수는 2.06×10^{5}가 된다.

꼬리지느러미의 단면을 자르는 수평 측정단면은 꼬리지느러미의 중앙(50% 단면), 중앙으로부터 위쪽 끝까지의 중간(75% 단면), 위쪽 끝 쪽 95% 지점(95% 단면) 3 곳이다. 측정단면은 변형각도 0도에서 좌우(z축 방향)로 20mm이고 자유류 방향으로 40mm인 40mm×40mm 크기의 단면이다. Fig. 11에 표시한 것과 같이 x 축은 자유류 방향, y 축은 풍동 측정부의 수직방향, z 축은 풍동 측정부의 횡방향이다.

Fig. 11은 이와 같은 모델과 실험 조건에서 단순 진동(simple oscillation)하는 꼬리지느러미의 후류를 PIV를 사용하여 측정하는 실험장치도이다. 사용한 PIV 측정 장치는 최대 pulse energy가 200mJ이며 반복 율(repetition rate) 10Hz인 Nd: YAG 레이저(Vlite-200), 12-bit 디지털 CCD 카메라(2048×2048 pixels), LaVision 사에서 개발한 측정자료 획득 및 처리 A/D 보드와 후속처리를 위한 DaVis Flow Master 소프트웨어 등을 장착한 PC 시스템 등으로 구성되어 있다. Aerosol Generator를 이용하여 DEHS 입자들을 측정 전에 살포해 놓은 후 PIV 측정 중에는 Generator를 꺼놓은 상태에서 실험을 수행하였다. PIV 시스템의 정보 획득 율(sampling frequency)은 15Hz이며, 제시된 PIV 결과는 총 30회의 PIV 측정 자료에 대한 평균값이다.

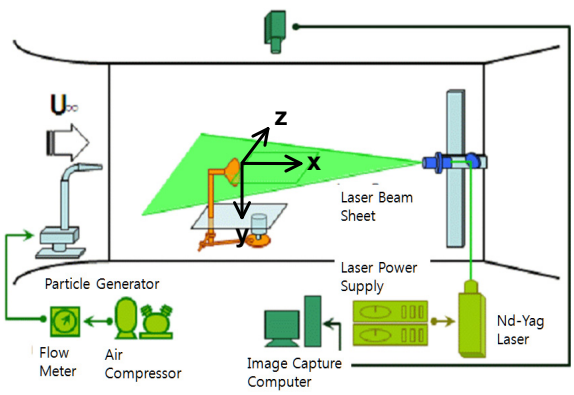
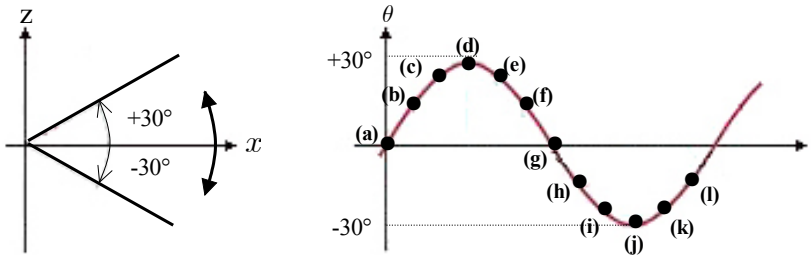
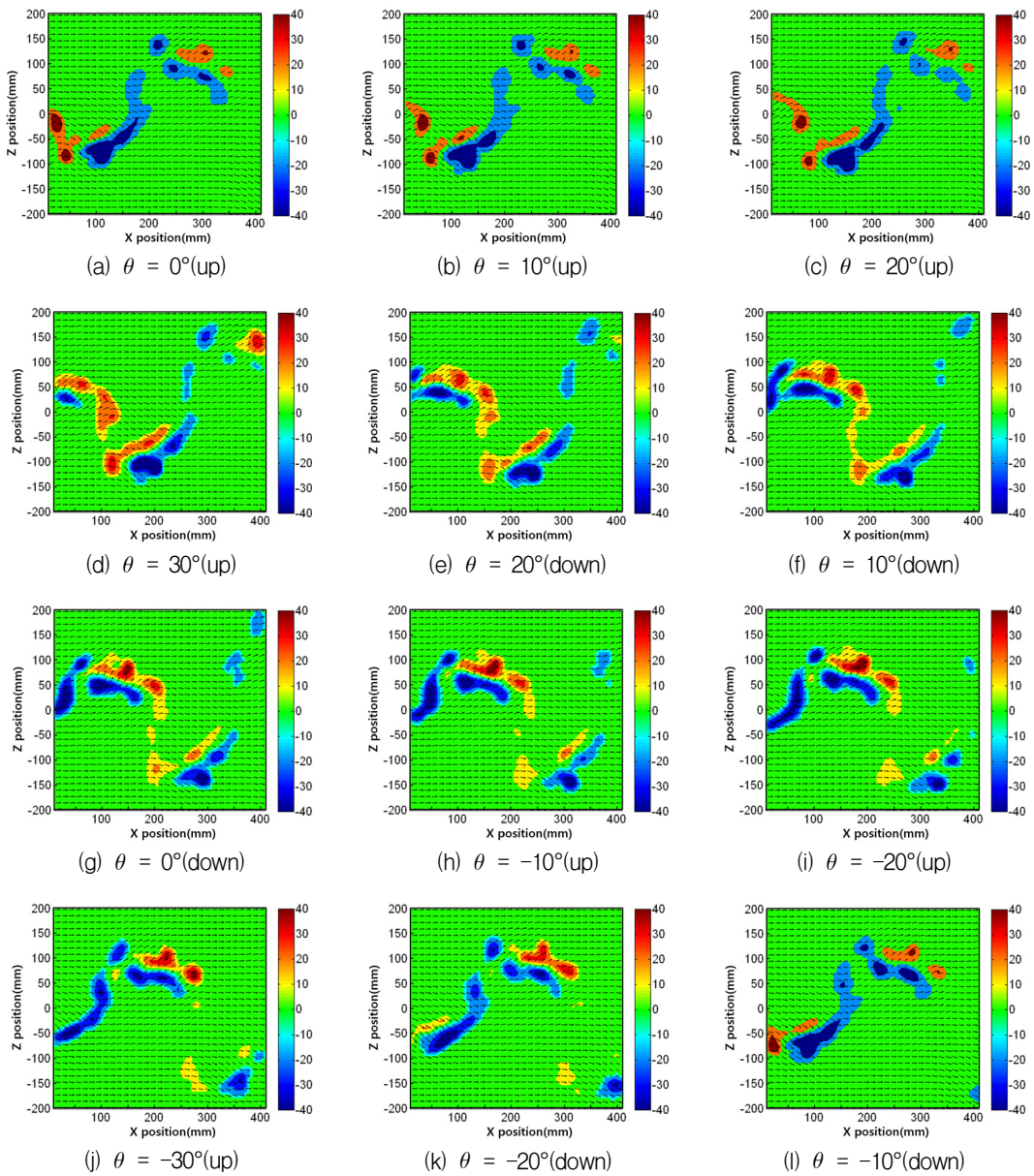


Fig. 11. PIV measurement system

Fig. 12는 부채(fan) 형태인 shape A의 후류 단면의 속도 벡터와 와도 선도(vorticity contour)이다. 40mm×40mm의 측정단면에서 획득한 속도 벡터의 개수는 4,096(64×64)이며, 벡터는 자유류 속도가 포함된 속도 벡터이다. Fig. 12에 표시된 속도 벡터는 한 개씩 걸러서 나타내어 벡터가 겹쳐 보이지 않도록 하였다. 와도는 속도장의 미분을 취하여서 구하였다. 와도 장에서 붉은 색조의 와도는 시계방향의 회전을 나타내며,





(a) θ = 0°(up) (b) θ = 10°(up) (c) θ = 20°(up)

(d) θ = 30°(up) (e) θ = 20°(down) (f) θ = 10°(down)

(g) θ = 0°(down) (h) θ = −10°(up) (i) θ = −20°(up)

(j) θ = −30°(up) (k) θ = −20°(down) (l) θ = −10°(down)

Fig. 12. Velocity vectors and vorticity contour at 75% span for the caudal-fin shape A(fan shape)

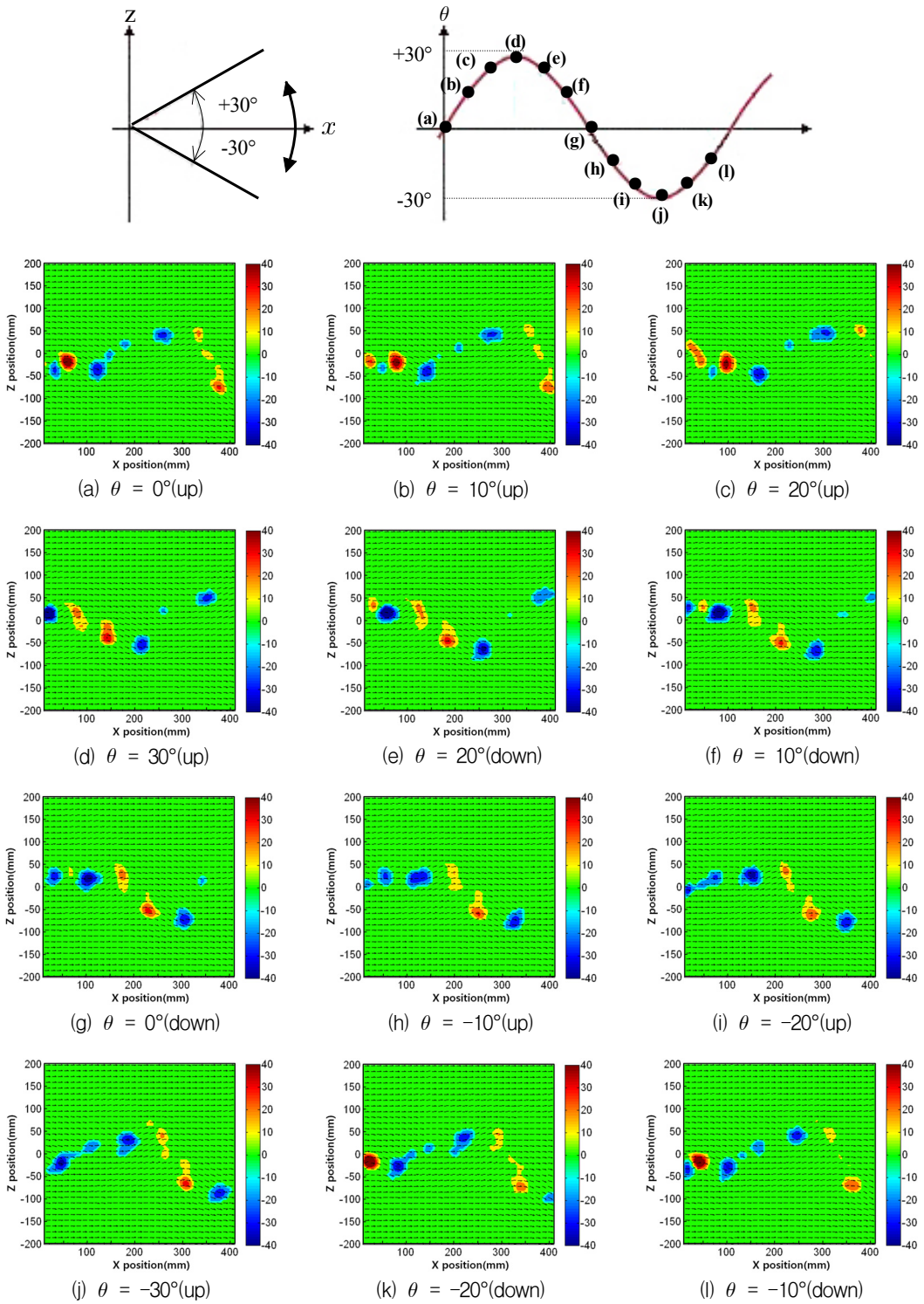


Fig. 13. Velocity vectors and vorticity contour at 75% span for the caudal-fin shape B(crescent-moon shape)

푸른 색조의 와도는 반시계방향의 회전을 나타낸다. 캡션에 나타낸 변형 각도 (Θ)는 0도는 자유류 속도와 0도를 이룬 각도를, +각도는 +z 축 방향으로 변형된 각도를 나타낸다. Upstroke는 변형각의 절대 값이 커지는 것을, downstroke는 변형각의 절대 값이 작아지는 것으로 정의하였다. 측정단면은 중앙에서 75% 떨어진 단면이다.

Fig. 12는 부채 형태의 지느러미가 단순진동을 할 때 upstroke시와 downstroke시에 시계방향과 반시계방향의 와류(vortex)가 교대로 발생하여 흘림(shedding)되고 하류로 대류 이동(downstream convection)하는 것을 잘 보여주고 있다. 이때 +방향의 upstroke시에는 시계방향으로 회전하는 와류가 발달하여 흘림이 일어나고 (Fig. 12 a, b, c, d), 이어서 downstroke이 시작되면 반시계방향으로 회전하는 와류가 발달하여 흘림이 일어난다(Fig. 12 e, f, g). 이와 같은 반시계 방향 와류의 발달과 흘림은 음(negative) 변형각의 upstroke시 까지도 계속되다가(Fig. 12, h, i, j), - 방향 변형각의 downstroke시에 다시 시계방향 와류의 발달과 흘림이 일어난다(Fig. 12 k, l). Fig. 12는 또한 shape A의 75% 스팬 단면에서 발생하는 와류가 지느러미에서 떨어져 나갈 때까지 늘어난 형태의 집중된 와류(concentrated vortex of elongated shape)로 존재하며, 흘림이 일어나 하류로 대류이동이 된 후에야 분산되는 것을 보여주고 있다.

Fig. 13은 초생달 형태인 shape B의 후류 단면 속도 벡터와 와도 선도(vorticity contour)이다. 측정단면은 중앙에서 75% 떨어진 단면이다. 측정 벡터 수 등은 shape A에 대한 속도 벡터와 와도 선도인 Fig. 12에서와 동일하다. Upstroke시와 downstroke시에 시계방향과 반시계방향의 와류가 교대로 발생하여 흘림이 일어나고 하류로 대류 이동하는 유동 특성은 shape A에서와 동일하나, 와류의 강도가 현저히 약해지고, 늘어난 와류가 아니라 분산된 와류로 흘림과 대류이동이 관찰된다. 일련의 시계방향과 반시계방향의 와류가 물체면에서 끊임없이 흘러나오는 것과 같은 유동형태를 하고 있다. Shape A와 비교하여 와류의 강도가 현저히 약해졌을 뿐만 아니라, 하류로 대류이동하면서 횡 방향(z 축 방향)으로 분산되는 거리도 감소하고 있음이 관찰된다.

Fig. 12와 13을 비교하면 upstroke +20도에서는 시계방향의 와류(붉은 색조)가 발생하고, upstroke -20도에서는 반시계방향의 와류(푸른 색조)가 발생하는 것은 shape A와 shape B가 동일하나, 단면의 코드가 작은 초생달 형태인 shape B가 발생시키는 와류는 보다 단절된 상태의 와류(discrete vortices)를 발생시킴이 관찰 된다. 그러나 교대로 흘림이 일어나는 시계방향과 반시계 방향의 와류로 구성된 와류쌍이 대류 이동하는 속도는 shape A와 shape B가 거의 동일하다.

4. 결 론

자연계의 수중동물은 오랜 기간 동안 살고 있는 환경에 가장 적합하게 몸의 형태와 운동 양식을 변화시키며 인간이 만든 기계와는 비교가 되지 않는 효율성과 우수한 운동성능으로 헤엄침을 하고 있다. 따라서 수중동물의 몸체 형태와 헤엄침 성능과의 관계를 규명하는 연구는 수중동물의 헤엄침 능력에 대한 비밀을 푸는데 매우 유용한 방법 중 하나이다. 이와 같은 관점에서 수중동물의 헤엄침 성능과 형태적인 특징과의 관계를 찾는 연구를 시도하였다.

먼저 수중동물의 형태특성(body shape, fin shape and arrangement)과 운동특성(cruising performance, maneuvering performance)간의 상관관계에 중점을 두고 문헌연구를 수행하였다. 또한 물고기 형태 모델을 사용한 수조실험과 풍동 실험(wind tunnel experiment)을 통하여 수중동물의 굽이침 운동(undulating motion)과 관련한 유체력 발생과 유동현상을 연구하였다. 수조실험에서는 굽이침 운동을 하는 고등어 형태의 모델에서 발생하는 추력을 측정하였으며, 풍동실험에서는 PIV (Particle Image Velocimetry)에 의한 후류의 속도 벡터와 와도(vorticity)를 측정하였다. 이때 모델의 형상 변화는 수중동물의 운동기능을 제공하는 몸체와 지느러미 중 운동성능이 다른 종류에 따라 확연하게 달라지는 꼬리지느러미(caudal fin)의 형태 변화를 대상으로 하였다. 연구결과는 형태학적 관점에서의 연구가 수중동물의 헤엄침 성능의 비밀을 밝히는데 매우 유용한 자료를 제시함을 보여주었다.

후 기

이 연구는 한국학술진흥재단의 연구비 지원으로 이루어졌습니다(과제번호 KRF-2007-313-D00095). 이에 감사를 드립니다.

References

[1] 손 명환, 한 철희, "수중동물의 헤엄침 역학," 한국군사과학기술학회지, 제10권 제3호, pp. 189～199, 2007.

[2] Azuma, A., The Biokinetics of Flying and Swimming, 2nd ed., AIAA Education Series, 2006.

[3] Webb, P. W., "Form and Function in Fish Swimming", Scient. Am. Vol. 251, pp. 58～68, 1984.

[4] Videler, J. J., Fish Swimming, Chapman & Hall, pp. 84～92, 1993.

[5] Fisher, R. and Hogan, J. D., "Morphological Predictors of Swimming Speed : A Case Study of Pre-settlement Juvenile Coral reef Fishes", J. of Experimental Biology, Vol. 210, pp. 2436～2443, 2007.

[6] Webb, P. W., "Effects of median-fin Amputation on Fast-Start performance of Rainbow Trout(Salmo Gairdneri)", J. of Experimental Biology, Vol. 68, pp. 123～135, 1972.

[7] Tong, Bing-Gang, Zhuang, Li-Xian, Cheng, Jian-Yu, "The Hydrodynamic Analysis of Fish Propulsion Performance and its Morphological Adaptation", Sadhana, Vol. 18, Part 3 & 4, pp. 719～728, 1993.

[8] Bandyopadhyay, P. R., Casano, J. M., Philips, R. B., Nedderman, W. H., and Macy, W. K., "Low-Speed Maneuvering Hydrodynamics of Fish and Small Underwater Vehicles", J. of Fluids Engineering, Vol. 119, pp. 136～144, 1997.

[9] Fish, F. E., "Comparative Kinematics and Hydrodynamics of Odontocete Cetaceans : Morphological and Ecological Correlates with Swimming Performance", J. of Experimental Biology, Vol. 201, pp. 2867～2877, 1998.

[10] Barlow, J. B., Rae, Jr. W. H., and Pope, A., Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, 3rd ed., pp. 609～651(Chap. 15 Marine Vehicles), 1999.

[11] Watt, G. D., Nguyen, V. O., Cooper, K. R., and Tanguay, B., "Wind Tunnel Investigations of Submarine Hydrodynamics", Canadian Aeronautical and Space Journal, Vol. 39, pp. 119～126, 1993.

[12] Fidler, J. E., and Smith, C. A., "Methods for Predicting Submersible Hydrodynamic Characteristics", Naval Coastal System Laboratory NCSC TM-238, Panama City Florida, July 1978.