

Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry 기법을 사용한 동물성 플랑크톤(요각류 *Calanus sinicus*)의 헤엄침 양태 연구

Swimming Behavior Study of the Zooplankton(Copepod *Calanus sinicus*)
by Using a Holographic Particle Tracking Velocimetry Technique

손 명 환*	박 병 화*	최 용 석*	이 상 준*
Myong Hwan Sohn	Byung Hwa Park	Yong Seok Choi	Sang Joon Lee
	강 영 실**	강 양 순**	
	Young Sil Kang	Yang Soon Kang	

Abstract

The present study investigated the swimming pattern and appendage postures of a copepod species, *Calanus sinicus*, which prevails in the south-east sea of the Korean peninsula, by employing a digital holographic particle tracking velocimetry(PTV) technique. The results showed that the copepod *Calanus sinicus* had various swimming patterns such as hover, hop, sink, cruise, and downward cruise. Most frequent pattern was the 'hop and sink'. The average swimming speeds ranged from 1.1 to 45.7 body-lengths/s, and the corresponding flow Reynolds number ranged from 10^0 to 10^2 .

Keywords : 요각류(Copepods), *Calanus Sinicus*, Holographic Particle Trajectory Velocimetry(PTV), Swimming Speed, Swimming Pattern, Appendage Posture

1. 서론

동물성 플랑크톤은 식물성 플랑크톤-동물성 플랑크톤-어류로 연결되는 해양 생물의 먹이 사슬(food chain)

에서 중요한 위치를 차지하고 있다. 이중 요각류(copepod)는 (Fig. 1) 물이 있는 곳이면 어디에나 존재하며 전체 동물 플랑크톤의 50~80%를 차지하여 동물성 플랑크톤 중에서도 가장 중요한 해양 생물이다. 요각류는 주 소비자로 해양 먹이사슬의 출발점에 있는 것과 아울러, 이들의 막대한 양의 배설물은 해양 박테리아 등과 같은 종속생물에게 먹이를 제공하여 햇빛이 있는 얇은 해양 영역으로부터 햇빛이 닿지 않는 깊은 해양 영역으로 햇빛 에너지가 전달되는 역할을 수행한

† 2010년 7월 10일 접수~2010년 9월 10일 게재승인

* 포항공과대학교

** 국립수산과학원

책임저자 : 손명환(myongsohn@postech.ac.kr)

다. 따라서 요각류가 없다면 해양생물계 전체 시스템이 무너질 것으로 해양생물학자들은 보고 있다^[1].

곤충은 개체수의 우월성과 거주지의 편만성(ubiquitousness) 등 관점에서 육지에서 가장 성공한 동물로 간주된다. 요각류는 바다에서 가장 성공한 동물이라는 관점에서 바다의 곤충(insects of the sea)이라 불리우기도 한다^[1]. 곤충은 공기 중을 날 수 있는 능력을 가짐으로써 먹이를 보다 쉽게 획득하고, 포식자를 피하며 또한 먹이 섭취와 번식이 용이한 새로운 공간으로 이동을 할 수 있다. 이와 같은 곤충의 비행능력이 곤충을 땅 위에서 가장 성공한 동물로 만든 원인 중 하나라고 보고 있다. 요각류가 바다 속에서 해류와 시간을 적절하게 선택하여 바다의 수직공간을 이동하는 능력은 곤충이 지상에서 공기 중을 비행하는 능력에 해당한다. 즉 요각류는 바다에서 부유하며 수동적으로 먹이를 취하고 포식자를 피하는 것이 아니라, 다양한 부속지(appendage)를 이용하여 해류 속에서 이동하고 먹이를 취하며 포식자를 회피하는 능력을 가졌기 때문에 가장 성공한 해양 동물이 되었던 것이다.

요각류의 헤엄침 양태와 요각류가 먹이를 잡기 위해 발생시키는 유동장인 먹이유동(feeding current) 덕분에 요각류는 매우 작은 개체밀도를 갖는 바다 속 먹이감과 포식자들이 있는 바닷속에서도 개체 수를 크게 증가시킬 수가 있었다. 먹이유동의 형성과 이동능력은 요각류가 먹이와 접하는 빈도수를 증가시키고, 도망치려는 먹이감을 요각류가 쉽게 검출할 수 있게 해주기 때문에 요각류의 헤엄침 양태와 주변 유동장과 대한 지식은 요각류의 기본적인 생태를 이해하는데 매우 중요한 지식이 된다.

대부분 수중 동물의 헤엄침은 중에 따라 일정한 고유의 레이놀즈 수(reynolds number) 영역이 정해져 있다. 그러나 해양 요각류의 헤엄침은 이와 같은 일반경향에서 벗어나는 것으로 알려져 있다^[2,3]. 많은 Calanoid 요각류는 다양한 양태로 헤엄을 치는데, 각 양태마다 다른 그룹의 부속지를 사용한다. 그리하여 중에 따라서, 또한 헤엄침 양태에 따라서 헤엄침 레이놀즈 수는 10^1 부터 10^2 범위의 다양한 값을 갖는다. 성체 요각류의 평균 길이는 1~2mm이지만 어떤 요각류의 성체의 길이는 0.2mm 보다 짧고, 어떤 요각류는 10mm 보다 큰 성체 길이를 가지기도 한다. Calanoid 요각류는 포식자로부터의 회피 반응(escape response)을 할 때와 뛰어오를 때(hops) 그리고 먹이를 잡기 위해 돌진할 때와 같이 짧은 거리를 신속히 움직일 때에는 일반적

으로 Fig. 1에 표시된 5쌍의 후방 헤엄침 다리 혹은 부속지(posterior swimming legs or posterior swimming appendages)을 사용한다. 성체 요각류의 평균 속도는 2~12mm/s이지만, 회피 반응을 할 때는 몇몇 요각류 종은 초당 몸 길이의 200배를 이동하는 속도를 가지는 것이 관찰되며, 이때의 레이놀즈 수는 500이 된다^[3].

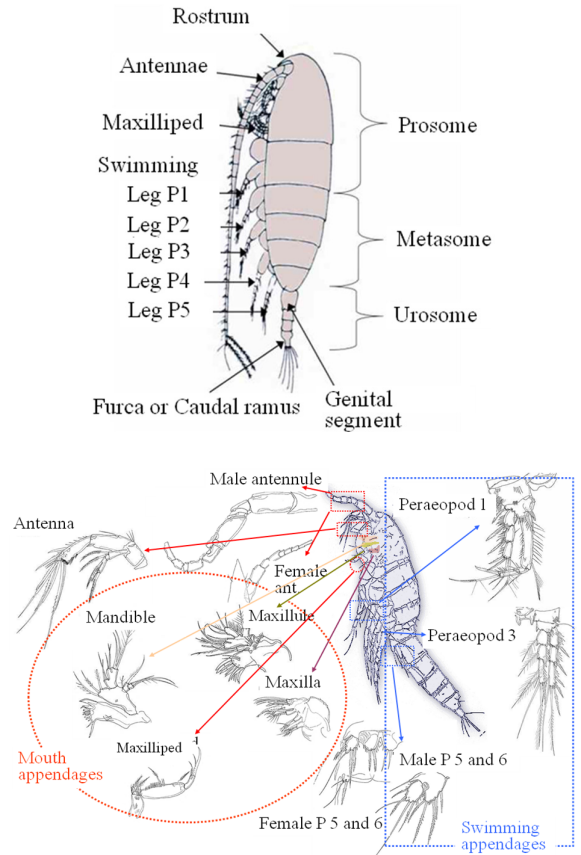


Fig. 1. Morphology of typical copepod^[4]

많은 과학자들이 요각류의 헤엄침 양태와 먹이유동을 연구하였다. 예를 들면, van Duren과 Videle^[3]는 *Temora longicornis*에 대하여 먹이를 찾는 움직임(foraging), 포식자를 회피할 때의 헤엄침 속도와 그에 따른 부속지의 운동을 krypton laser 광과 back-focus dark-field optical 시스템을 갖춘 초당 500 프레임의 고속 카메라를 사용하여 조사하였다. Strickler^[5]는 요각류가 자유 헤엄을 할 때의 먹이유동의 존재를 처음으로 발견하였다. Strickler는 Calanoid 요각류는 강한 먹이 유동을 발생시키고 먹이를 감지하기 위해 발생한

double shear field로 먹이를 끌어당기는 것을 보여주었으며, 또한 몸체의 자세와 헤엄침 속도는 다섯 가지의 힘(중력, 부력, 항력, 압력구배(pressure gradient), 토크)의 조합에 의해 결정된다는 것을 제안하였다. Malkiel 등⁶⁾은 처음으로 digital in-line holography를 이용하여 요각류의 3차원 자유헤엄침 궤적과 요각류 주위의 3차원 순간 속도장을 측정하였다.

본 연구는 한반도의 남동해안에 서식하는 요각류 중 우점종인 *Calanus sinicus*의 헤엄침 양태와 부속지의 움직임을 digital in-line holographic particle tracking velocimetry(PTV) 기법을 이용하여 측정하였다. 요각류의 운동능력과 헤엄침 양태에 대한 지식은 이들이 먹이를 포획하고 포식자를 피하며 짝을 찾는 등의 가장 기본적인 생태(fundamental ecology)를 이해하는데 매우 중요하다. 그러나 이들이 갖는 다양한 헤엄침 양태와 부속지의 빠른 움직임을 관찰하고 측정하는 것은 기술적으로 쉽지 않은 문제로 최근에야 연구가 활발해지고 있으며, 특히 국내에서는 요각류의 운동능력과 운동 메커니즘 관점에서의 연구는 거의 이루어지고 않고 있다. Digital in-line holography 기법은 millisecond의 시간분해 능력과 micrometer의 공간분해 능력을 갖고 있기 때문에, 3차원 공간에서 움직이는 미소생물의 궤적과 거동을 측정하는데 최근 활발하게 사용되기 시작하고 있다^{7~9)}. 본 연구는 Digital in-line holography에 기초한 PTV기법을 사용하여 한반도 주변 연안의 우점종 요각류 *Calanus sinicus*에 대하여 헤엄침 양태와 부속지의 움직임을 분석하였다.

2. 실험 생물 및 실험 방법

가. 실험 생물

실험에 사용한 생물은 2009년 6월 13일에 위도 34° 51'N 경도 128° 26'E에서 채집된 *Calanus sinicus* 성체이다. 채집된 장소의 바닷물을 여과하여 담은 1리터 통에 5마리의 수컷과 1마리의 암컷을 분리하여 보관하였다. 개체들의 평균 크기는 약 2.45mm이다. 실험실에서는 약 18°C의 암실에서 개체를 보관하였다. 개체는 보관용 통에서 자유롭게 헤엄칠 수 있었으며 먹이는 주어지지 않았다. 실험을 할 때는 식물성 플랑크톤인 *Skeletonema costatum*을 먹이로 주었다. Fig. 2는 *Calanus sinicus*가 실험 용기에서 자유롭게 헤엄치는 모습을 보여준다.



Fig. 2. Optical microscopy photo of the copepod *Calanus sinicus* swimming freely in the test vessel

나. In-line digital holography 실험 장치

본 연구에 사용된 digital in-line holography system은 고속카메라, 레이저, 그리고 AOM Chopper로 구성되어 있다(Fig. 3). He-Ne 레이저(최대 출력 30mW, 파장 633nm)와 AOM Chopper으로 개체에 쏘일 조명을 만든다. 홀로그래프 이미지는 1,024×1,024pixels(17μm per pixel)의 분해능을 가지는 고속 디지털 CMOS 카메라(Photron, FASTCAM Ultima-APX)로 촬영하였다. 요각류는 일반적으로 회피 반응과 같이 짧은 거리를 빠르게 움직일 때는 후방 헤엄침 다리를 사용한다. 그러므로 촬영속도는 높은 진동수(10²Hz 크기)로 진동하는 요각류의 부속지를 촬영할 수 있도록 매우 높아야 한다. 본 연구에서는 실험에 따라서 초당 500에서 2000 프레임의 속도로 촬영하였다.

위와 같은 실험 장비로 실험을 하였을 때, 공간분해(spatial resolution) 능력은 이미지 평면에서는 17μm 이고, 깊이 방향으로 100에서 200μm 이다. 본 연구에서는 사용한 digital in-line holography system은 이미지 평면에 수직인 깊이 방향(depth direction)으로의 분해능은 많이 제한되어 있다. 그러므로 요각류가 일반적으로 물 속에서 수직 방향으로 움직인다는 것을 고려하여 연직 방향과 이에 수직인 가로 방향을 이미지 평면으로 정하였다. 연직 방향은 y-축으로, 이미지 평면에서 연직 방향에 수직인 가로 방향은 x-축으로, 깊이 방향은 z-축으로 설정하였다.

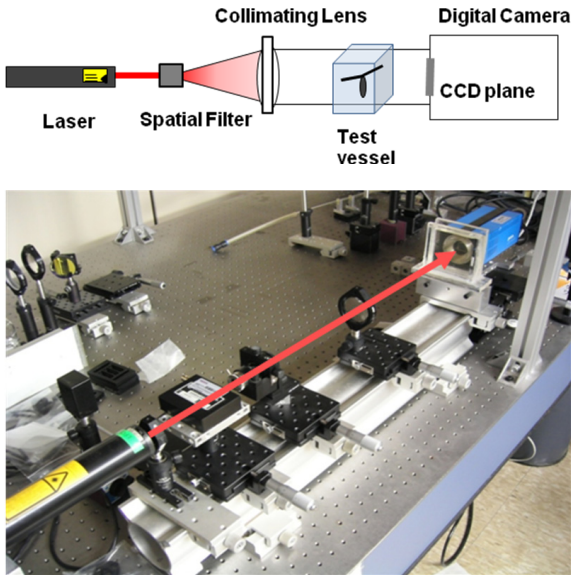


Fig. 3. Experimental setup for digital in-line holography

실험 용기는 BK7 glass window의 아크릴 입방체이며 크기는 50mm×50mm×30mm이다. 18℃로 작동하는 에어컨을 제외하고는 아무런 온도 제어기를 사용하지 않았다. 유체는 여과한 바닷물을 사용하였다.

다. 홀로그램 영상 획득 및 수치적 재생

일반적으로 digital in-line holography는 대상물의 in-line 홀로그램(hologram)을 디지털 방식으로 기록한 후, 수치적 재생(numerical reconstruction)을 통해 대상물의 3차원 정보를 재구성하는 일련의 과정으로 구성된다. 대상물의 In-line 홀로그램은 가간섭성(coherent)의 레이저를 사용하여 평면광을 생성시킨 후, 이를 대상물에 조사함으로써 얻어진다(Fig. 3). 이 때, 대상물의 표면에서 레이저 광의 회절(diffraction)이 일어나게 되는데 이렇게 회절된 물체파(object wave)와 회절이 일어나지 않은 참조파(reference wave)가 서로 간섭(interference)을 일으킴으로써 디지털 카메라의 CCD상에 대상물의 홀로그램인 줄무늬(fringe) 패턴이 만들어지게 된다. 이렇게 생성된 홀로그램 영상은 디지털 이미지로 컴퓨터에 저장된 후, 수치적 재생 과정을 거치게 된다.

촬영된 홀로그램 영상에는 실험 장치 자체에 의한 원치 않는 줄무늬 패턴들도 섞이게 되는데 수치적 재생 전에 이들을 제거해 주어야 한다. 이러한 잡음 패턴들은 일반적으로 고정되어 있으므로 획득된 홀로그

램 영상들의 평균(average) 영상을 계산하여 배경 영상을 만든 후, 배경 영상을 각 홀로그램 영상에서 빼줌으로써 깨끗한 홀로그램 영상을 얻을 수 있다.

홀로그램 영상의 수치적 재생은 디지털 홀로그램 영상 함수 $h(x,y)$ 와 파동(wave) 전파(propagation) kernel $g(x,y,d)$ 의 컨볼루션(convolution)을 통해 이루어진다^[10].

$$g(x,y,d) = \frac{i}{\lambda} \frac{\exp(-ik\sqrt{x^2+y^2+d^2})}{\sqrt{x^2+y^2+d^2}} \quad (1)$$

여기서 λ 는 레이저의 파장, $k=2\pi/\lambda$, d 는 홀로그램 면과 재생면(reconstruction plane) 사이의 거리이다. 이때, 컨볼루션 정리를 이용하면 컨볼루션의 계산을 빠르고 효율적으로 수행할 수 있다.

$$\Gamma(\xi,\eta) = F^{-1} [F \{ h(x,y) \} F \{ g(x,y) \}] \quad (2)$$

여기서 F 와 F^{-1} 는 각각 FFT(Fast Fourier Transform)와 inverse FFT를 나타낸다. x 와 y 는 홀로그램 면에서의 공간 좌표이고, ξ 와 η 는 재생 면에서의 공간좌표이다(Fig. 4). 대상물의 3차원 정보는 홀로그램 면으로부터 재생 면까지의 거리인 d 를 일정한격으로 증가시키며 수치재생을 반복적으로 수행해줌으로써 재구성할 수 있게 된다. 본 실험에서는 깊이 d 값은 200mm~250mm의 범위에서 0.2mm 간격으로 증가시키면서 홀로그램 영상을 재생하였다.

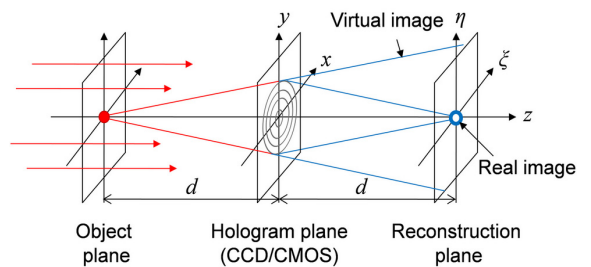


Fig. 4. Coordinate systems used for the numerical reconstruction

라. 3차원 위치 및 궤적 추적

Fig. 5는 자유 헤엄을 하는 *Calanus sinicus*의 3차원 위치 추적기법을 보여주고 있다. 그림과 같이 홀로그램 영상을 재생하면 배경은 어둡게 대상물은 밝게 나

타나게 된다. 이를 이용하여 재생된 영상들의 명암(intensity)값을 한 평면으로 투영(projection)한 투영 영상을 만들고 이 이미지의 명암 중심(centroid)을 찾음으로써 대상물의 평면 위치(in-plane(x, y) position)를 구할 수 있다. 또한, 재생된 영상을 보면 특정한 깊이 방향 위치(depthwise(z) position)에서 대상물의 형상이 또렷하게 나타나는 것을 관찰 할 수 있는데, 오토 포커스 함수(auto focus function)인 LAP 함수를 이용하면 그 깊이 방향 위치를 정확히 찾아낼 수 있다^[11,12].

$$LAP(z) = \sum_{x,y} \{ \nabla^2 I(x,y,z) \}^2 \quad (3)$$

여기서 $I(x,y,z)$ 는 깊이 방향으로 z 위치에서 대상물의 재생영상을 의미한다.

모든 홀로그래프 영상에 대하여 수치적 재생과 대상물의 3차원 위치 추적 과정을 반복함으로써 시간에 따른 대상물의 3차원 위치 정보를 얻을 수 있었다. 입자 추적 알고리즘^[13]을 이용하여 이를 3차원 궤적 정보로 변환한 후, 대상물의 시간에 따른 3차원 속도를 측정하였다.

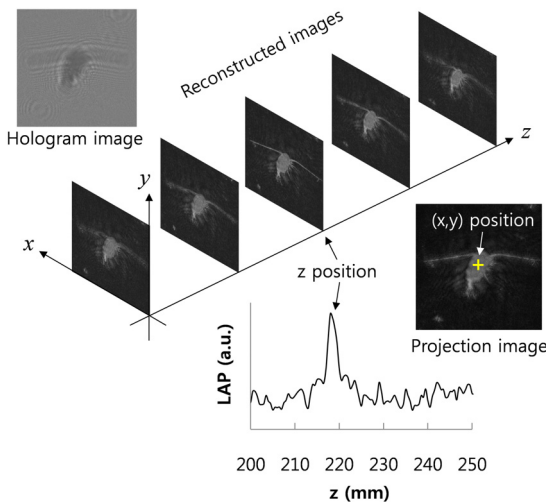


Fig. 5. Hologram image and its reconstructed images. In-plane (x,y) position is obtained from the centroid of the image. Depthwise (z) position is searched from the peak of the focus value (LAP) profile

3. 결과 및 토론

Calanoid 요각류는 두 가지의 명백한 헤엄침 양태를 보이는 것으로 알려져 있다. 첫 번째는 Fig. 1에 나타난 antennae, mandibular palps, maxillules, maxillae, maxillipeds 등을 빠르게 진동시키며 느리게 헤엄치는 양태(slow-swimming behavior)이다.

두 번째는 안테늘(antennules)과 후방에 위치한 5쌍의 헤엄침 다리를 한번에 내려치며(stroke) 빠르게 헤엄을 치거나 점프를 하는 양태이다. 그러나 Jiang 등^[14]은 Calanoid 요각류의 많은 종들이 ‘순항과 가라앉음(cruse와 sink)’ 또는 ‘점프와 순항(hop과 sink)’ 등과 같이 두 극단적인 헤엄침 양태 사이에서 다양한 헤엄침 양태와 자세를 가짐을 기술하고 있다.

본 연구의 대상 요각류인 *Calanus sinicus* 성체에서 점프(hop), 가라앉음(sink), 순항(cruise), 하방 순항(downward cruise)등의 모든 종류의 헤엄침 양태를 관찰할 수 있었다. 그러나 가장 잘 빈번한 헤엄침 양태는 점프와 가라앉음 이었다. 하방 순항은 20번 중 1번 보일 정도로 매우 드물었다. *Calanus sinicus*의 먹이를 찾는 순항 모드(foraging mode)에서는 입 주변 부속지(mouth appendages)가 adlocomotory metachronal wave로 작게 진동하며 뒤로 매우 강하게 powered stroke을 가하며 천천히 부드럽게 이동하였다. 회피나 점프 모드에서는 후방 헤엄침 다리가 강하게 powered stroke을 가하는 방법으로 움직였다. 가라앉음 모드에서는 요각류가 몇 초간 가라앉고 짧게 위로 점프하며 다시 가라앉았다.

Fig. 6은 공간에 고정된 관측계에서 측정된 ‘hop-foraging-hop’ 헤엄침 모드의 3차원 궤적과 각 헤엄침 모드에서의 요각류의 몸체와 부속지들의 전형적인 모양을 보여준다. Fig. 6에서 x 는 가로 방향, y 는 연직방향, z 는 이미지 깊이 방향이다. 앞서 기술한 바와 같이 본 연구에서 사용한 digital holography system은 깊이 방향(z -축 방향)으로는 공간분해 능력이 0.1mm에서 0.2mm로 이미지 평면의 공간분해 능력(0.017mm)에 비하여 떨어진다. 따라서 이와 같은 측정 장비상의 특성과 실험 생물이 주로 연직 방향(y -축)으로 움직인다는 점을 고려하여 헤엄침 속도의 계산시에는 이미지 평면인 x - y 평면에 투영된 궤적을 사용하였다.

Fig. 6의 *Calanus sinicus* 개체는 가로방향으로 잠시 동안 제자리 맴돌이를 하다가 순식간에 위 방향으로 점프를 하고, 먹이 탐색 순항(foraging)을 하다가 두 번

체 점프를 한다. 가로방향으로 점프할 때 왼쪽 안테늘 (antennules)을 쉴룩거리며(tickering) 입 주변 부속지는 67Hz 정도의 속도로 진동을 한다. 이와 같은 단계는 Fig. 6에 A로 표시되어 있다. A에서의 평균 속도는 초당 약 3.0배의 몸길이 속도(약 7.7mm/s)였다. 첫 점프의 순간에 *Calanus sinicus*는 안테늘을 접고 후방의 헤엄침 다리를 크게 powered stroke하여 빠르게 움직인다. 이와 같은 단계는 Fig. 6에서 B이다. Fig. 6의 B 단계에서 일정 시간 간격으로 순간 위치를 나타내는 점들의 간격이 커진 것은 이 단계에서 헤엄침 속도가 커진 것을 나타낸다.

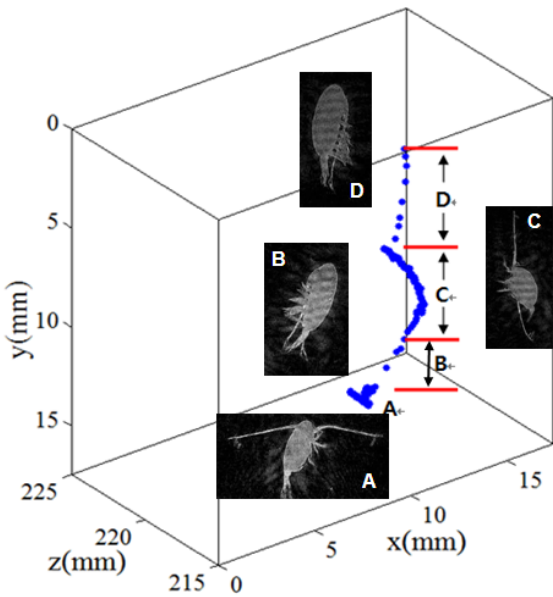


Fig. 6. Trajectory of the organism and in the 'hop-foraging-hop' mode and appendage posture in each phase

B단계의 평균 헤엄침 속도는 초당 약 37.4배의 몸길이 속도(약 92.5mm/s)였다. 세 번째 단계는 순항을 하는 C단계이다. 이 단계에서 개체는 모든 부속지들을 진동하며 왼쪽과 위 방향으로 움직인다. C단계에서 평균 헤엄 속도는 초당 약 4.9배 몸길이 속도(약 12.1mm/s)이다. 이 순항 모드 다음에 개체는 두 번째 큰 점프를 한다(D 단계). 이 때의 평균 헤엄 속도는 초당 약 45.7배 몸길이 속도(약 113mm/s)이다. 이와 같은 과정 동안 요각류 주변 유동장의 레이놀즈 수는 몸체 길이(2.47mm)와 평균 헤엄 속도를 가지고 계산

하였을 때 약 20(A와 C에서) 부터 280(B와 D)까지의 범위를 가졌다.

Fig. 7은 'hop-cruise-sink' 헤엄 모드에서의 3차원 궤적과 각 단계에서의 전형적인 부속지들의 모습이다. A단계에서는 약 2.21mm 길이의 *Calanus sinicus*가 후방 헤엄침 다리의 강한 powered stroke과 함께 점프를 한다. 이 때의 평균 속도는 초당 약 16.3배 몸길이 속도(약 36mm/s)이다. 점프를 한 후, 개체는 잠시 동안 B단계에서 순항을 한다. 이 순항 단계에서, 모든 입 주변 부속지는 매우 빠르게 진동을 하고 안테늘은 펼쳐져 있다. 이 때의 평균 속도는 초당 약 1.1배 몸길이 속도(약 2.5mm/s)이다. 짧은 순항 단계를 지난 후, 개체는 아무런 운동을 하지 않으며 매우 짧은 시간 동안 가라앉고(C단계), 두 번째 순항(D)을 한다. 이 두 번째 순항(D)은 첫 번째 순항(B)에 비하여 길게 지속된다. D단계에서 매우 빠르게 진동하는 입 주변 부속지와 접혀지지 않은 안테늘 등 다른 부속지들의 자세는 첫 번째 순항인 B단계에서와 같다. D 단계에서 평균 헤엄 속도는 초당 약 2.3배 몸길이 속도(약 5.1 mm/s)이다. 순항 단계를 지난 후, *Calanus sinicus*는 E 단계의 매우 긴 잠수모드에 들어간다. 이 때의 평균 헤엄 속도는 초당 약 1.4배 몸길이 속도(약 3.1mm/s)

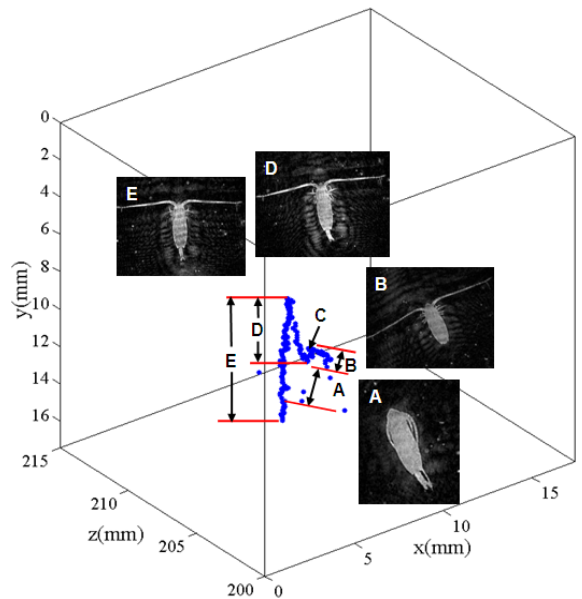


Fig. 7. Trajectory of the organism in the 'hop-cruise-sink' mode and appendages posture in each phase

이다. 안테늘은 펼쳐져 있으며 모든 부속지들은 움직이지 않는다. 이와 같은 과정 동안의 레이놀즈 수 범위는 약 5.3(B단계)부터 76(A단계)이다.

Fig. 8은 'hop-upside down cruise' 헤엄 모드의 3차원 궤적이다. 여기서 매우 드문 하방을 향하며 헤엄치는 upside down swimming 케이스가 관측되었다(20케이스 중 1회). A는 점프 단계이고 B는 머리가 밑을 향하는 하방 순항 단계이다. Fig. 8의 'Upside down cruise'에서의 부속지들의 자세는 Fig. 6과 Fig. 7에서의 상방 순항에서의 부속지들의 자세와 같았다.

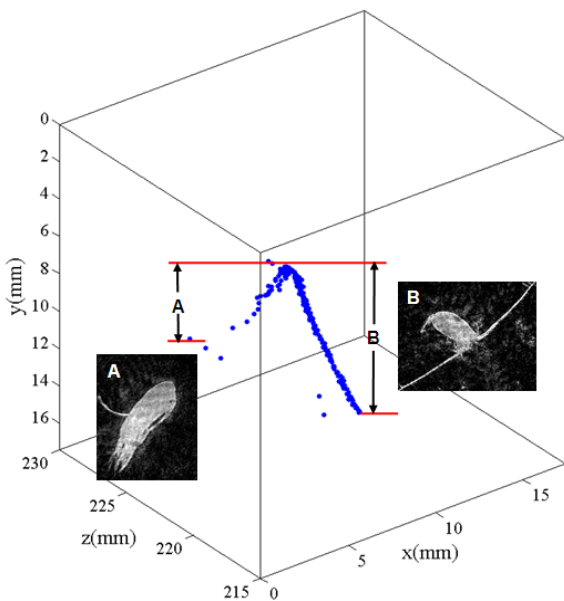


Fig. 8. Trajectory of the organism in the 'hop-upside down cruise' swimming mode and appendage posture in each phase

Fig. 6, 7, 8의 헤엄침 양태와 부속지 움직임을 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다. 순항 헤엄 단계에서는 입 주변 부속지가 약 67Hz로 매우 빠르게 진동하며 안테늘은 펼쳐져 있다. 그리고 이 때의 평균 속도는 초당 약 1.1~4.9배 몸길이 속도이다. 점프 헤엄 단계에서는 후방 헤엄침 다리를 사용하여 커다란 powered stroke을 하며 매우 큰 추진력을 얻는다. Powered stroke 이후에는 안테늘과 다른 부속지들은 접고 움직인다. 점프 헤엄 단계에서의 최대속도는 초당 45.7배 몸길이 속도이다. 가라앉는 단계에서는 안테나를 펴고 다른 부속지는 일체 움직이지 않는 상태

로 서서히 가라앉는다. 이와 같은 다양한 헤엄침 양태에서의 레이놀즈 수는 10^0 에서 10^2 배의 범위에 걸쳐 있다.

지구상에서 다양한 수중 동물들의 질량의 범위는 10^{19} 배 영역에 걸쳐 분포한다^[15]. 한쪽 끝에 위치한 푸른 고래는(blue whales) 지구상에서 가장 큰 동물로 길이가 약 33m이고 질량은 약 180,000kg이다. 반면 미생물인 박테리아는 길이가 약 10^{-6} m이고 질량은 약 10^{-18} ~ 10^{-13} kg이다. 절대속도는 크기가 큰 생물일수록 빠르지만, 절대속도를 몸 크기로 나눈 상대속도를 비교하면 미생물이 큰 생물보다 우월하다. 튜나(tuna)와 같은 몸체가 큰 해양 물고기는 초당 10배의 몸길이 속도를 가지며^[16], 푸른 고래와 사람은 초당1배의 몸길이 속도로 헤엄칠 수 있다^[16]. 하지만 많은 미생물은 초당 수십에서 수백 배의 몸길이 속도로 헤엄칠 수 있다. 예를 들면, 적조(red tides)를 일으키는 운동성 식물성 플랑크톤의 한 종류인 *Cochlodinium polykrioides*는 초당 십 배 몸길이 속도로 헤엄칠 수 있고^[17], 어떤 박테리아는 초당 수십 배 몸길이 속도로 헤엄칠 수 있다^[18]. 본 연구에서 측정된 요각류인 *Calanus sinicus*는 점프 헤엄침 단계에서 초당 45.7배 몸길이 속도를 가졌다.



Fig. 9. Comparison of copepod's swimming and human's swimming at the dynamically similar condition

Fig. 9는 요각류의 헤엄침과 사람의 헤엄침을 동일한 상사조건(동일한 레이놀즈 수)에서 비교한 것이다. 크기가 약 2.5mm인 *Calanus sinicus*가 바닷물(점도가 약 0.001Pa·s)에서 120mm/s의 속도로 헤엄치는 것은 몸길이 1.8m의 사람이 꿀로 채운 수영장(점도가 약 10Pa·s)에서 1.67m/s로 움직이는 것과 상응한다. 물론 수영 세계 챔피언 초차도 꿀로 채운 수영장에서 1.67 m/s로 움직일 수 없다. 꿀이 사람에게 점도가 매우 높

은 유체이듯이 물은 요각류에게 매우 점도가 높은 유체이다. 그렇지만 요각류는 그런 점도가 높은 유체 속에서도 초당 수십에서 수백 배의 몸길이 속도로 움직일 수 있는 운동능력을 가지고 있다. 따라서 몸길이가 수 mm인 동물성 플랑크톤인 *Calanus sinicus*는 레이놀즈수가 10^0 에서 10^2 인 천이관성 유동 영역(transient inertial flow region)에서 헤엄치지만, Stokes 유동영역인 레이놀즈 수가 10^{-5} 에서 10^{-1} 에서 헤엄치는 박테리아, 정자(sperm), 운동성 식물성 플랑크톤 등과 같은 미소생물에도 필적하는 운동능력을 갖고 있음을 확인할 수 있다.

4. 결론

한반도의 남동해안에 서식하는 우점종 요각류인 *Calanus sinicus*의 헤엄침 양태와 헤엄침에 따른 부속지들의 움직임을 digital in-line holographic particle tracking velocimetry(PTV) 기법으로 측정하였다. 요각류 *Calanus sinicus*는 ‘점프(hop)’, ‘가라앉음(sink)’, ‘순항(cruise)’, ‘하방 순항(downward cruise)’ 등의 여러 가지 헤엄침 양태를 보여주었다. 그러나 가장 잘 빈번한 헤엄침 양태는 ‘점프와 가라앉음’ 이었다. 이들 각 헤엄침 양태에서의 평균 헤엄침 속도는 초당 약 1.1배 몸길이 속도에서부터 약 45.7배 몸길이 속도 이었으며, 레이놀즈 수 영역은 10^0 부터 10^2 였다.

요각류의 헤엄침 운동학에 대한 지식은 해양 먹이사슬에서 매우 중요한 위치를 차지하고 있는 요각류의 먹이 획득 기제, 포식자로부터의 회피 기제 등과 같은 중요한 기본생태를 밝히는데 크게 기여할 수 있다. 또한 요각류의 헤엄침 운동학에 대한 지식은 점도가 매우 큰 유체 속에서 효과적으로 이동할 수 있는 미소로봇 제작 등에 유용하게 응용할 수 있는 원천지식을 제공할 수 있다.

후 기

이 논문은 교육과학기술부/한국연구재단 창의적 연구진흥사업(생체유동현상 규명 및 생체모방 연구)의 재원으로 수행된 연구임.

Reference

- [1] Schminke, H. K., “Entomology for the Copepodologist”, J. of Plankton Research, Vol. 29, Supplement I, pp. 1149~1162, 2007.
- [2] Stamhuis, E. J., Videler, J. J., van Duren, L. A. and Muller, U. K., “Applying Digital Particle Image Velocimetry to Animal-Generated Flows : Traps, Hurdles and Cures in Mapping Steady and Unsteady Flows in Re Regimes between 10^{-2} and 10^{5} ”, Experiments in Fluids, Vol. 33, pp. 801~813, 2002.
- [3] van Duren L. A. and Videler, J. J., “Escape from Viscosity : The Kinematics and Hydrodynamics of Copepod Foraging and Escape Swimming”, J. Experimental Biology, Vol. 206, pp. 269~279, 2003.
- [4] Huys, R. and Boxshall, G. A., “Copepod Evolution”, the Ray Society, 1991.
- [5] Strickler, J. R., “Calanoid Copepods, Feeding Currents, and the Role of Gravity”, Science, Vol. 218, No. 8, pp. 158~160, 1982.
- [6] Malkiel, E., Sheng, J., Katz, J. and Strickler, J. R., “The Three-Dimensional Flow Field Generated by a Feeding Calanoid Copepod Measured using Digital Holography”, J. Experimental Biology, Vol. 206, pp. 3657~3666, 2003.
- [7] Lewis, N. I., Xu, W., Jericho, S. K., Kreuzer, H. J., Jericho, M. H. and Cembella, A. D., “Swimming Speed of Three Species Alexandrium(Dinophyceae) as Determined by Digital In-Line Holography”, Phycologia, Vol. 45, pp. 61~71, 2006.
- [8] Sheng J., Malkiel, E., Katz, J., Adolf, J., Belas, R. and Place, A. R., “Digital Holographic Microscopy Reveals Prey-Induced Changes in Swimming Behavior of Predatory Dinoflagellates”, Proceedings National Academy of Science USA, Vol. 104, No. 44, pp. 17512~17517, 2007.
- [9] Katz, J. and Sheng, J., “Applications of Holography in Fluid Mechanics and Particle Dynamics”, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, pp. 531~555, 2010.
- [10] Schnars, U. and Jueptner, W., Digital Holography, Springer, Berlin, 2005.
- [11] Choi, Y. S. and Lee, S. J., “Three-Dimensional

- Volumetric Measurement of Red Blood Cell Motion using Digital Holographic Microscopy”, Applied Optics, Vol. 48, pp. 2983~2990, 2009.
- [12] Choi, Y. S. and Lee, S. J., “Holographic Analysis of Three-Dimensional Inertial Migration of Spherical Particles in Micro-Scale Pipe Flow”, Microfluidics and Nanofluidics, Vol. 9, pp. 819~829, 2010.
- [13] Baek, S. J. and Lee, S. J., “A New Two-Frame Particle Tracking Algorithm using Match Probability”, Experiments in Fluids, Vol. 22, pp. 23~32, 1996.
- [14] Jiang, H., Osborn, T. R. and Meneveau, C., “The Flow Field Around a Freely Swimming Copepod in Steady Motion. Part I : Theoretical Analysis”, J. of Plankton Research, Vol. 24, No. 3, pp. 167~189, 2002.
- [15] Yates, G. T., “How Microorganisms Move Through Water”, American Scientist, Vol. 74, pp. 358~365, 1986.
- [16] Azuma, A., The Biokinetics of Flying and Swimming, 2nd ed., AIAA Education Series, 2006.
- [17] Sohn, M. H., Lee, S. J., Seo K. W., Choi, Y. S., Kang, Y. S. and Kang, Y. S., “Digital Holographic PTV Analysis of the Motile Performance of the Red-Tide Algae ‘Cochlodinium Polykrikoides’”, American Physical Society Division of Fluid Dynamics, 62nd Annual Meeting, November 22~24, Minneapolis, MN, 2009.
- [18] Lauga, E. and Powers, T. R., “The Hydrodynamics of Swimming Microorganisms”, Report on Progress in Physics, Vol. 72, 096601, 2009.