

저 레이놀즈수 영역에서의 박테리아 편모형 프로펠러 성능평가 및 유동가시화

The Performance Evaluation and Flow Visualization of Helical Propeller at Low Reynolds Number

*김윤철¹, 고은², #전승완²

*Y. C. KIM¹, E. KO², #S. Jin(songwan@kpu.ac.kr)²

¹ 한국산업기술대학교 지식기반기술·에너지 대학원 기계시스템공학과, ² 한국산업기술대학교 기계공학과

Key words : Flagellar , Propulsion , Low Reynolds Number , PIV

1. 서론

수 백 만년 동안 자연은 살아남기 위해 환경에 적응하여 왔으며 이러한 적응과정을 통하여 가장 효율적인 생명체의 외형적 특성과 행동 패턴을 찾아내었다. 생체모방공학은 이러한 자연으로부터 아이디어를 얻어 다양한 분야의 문제들을 해결하고자 하는 새로운 접근 방법으로 이미 널리 알려진 바와 같이 옷에 붙어있는 씨앗의 표면으로부터 아이디어를 얻어 개발한 벨크로나 상어의 표면 특성을 응용하여 개발한 진신 수영복, 연꽃잎의 구조를 응용한 소수성 표면제작[1], 초소형 비행체 제작을 위한 잠자리, 나비 등과 같은 곤충[2]이나 한정된 공간에서도 기동성이 매우 뛰어난 박쥐의 비행 원리에 대한 연구[3], 물 위에서 뿔 수 있는 소금쟁이의 특성 연구[4] 환경오염을 감지하기 위한 물고기 로봇[5] 등과 같은 생체모방에 관한 연구가 국내외에서 활발하게 진행 중이다.

스프링모양의 독특한 프로펠러를 이용하여 헤엄치는 박테리아 역시 그 유영 원리를 알아내기 위해 다양한 연구가 진행되었다. 대부분의 박테리아는 단일 세포 미생물으로써 용수철처럼 생긴 편모라 불리는 꼬리가 있다. 박테리아는 이 편모를 한쪽 방향으로 회전시키는 동시에 등근 머리는 편모 회전과 반대 방향으로 회전하며 추력 및 회전력을 발생시킨다. 이러한 박테리아의 유영 방법은 우리가 생활하고 있는 큰 스케일의 유영체와는 사뭇 다른 형태를 띠고 있다.

이에 본 연구에서는 저 레이놀즈 수 영역에서 동작하는 편모 형태의 프로펠러의 특성을 관찰하였다. 편모 회전수 및 길이, 회전 속도 등 다양한 변화에 따른 추력과 토크를 측정하였으며 편모 주변의 유동장을 PIV 장비를 이용하여 가시화하였다.

2. 실험장치구성

박테리아 편모는 평균적으로 길이는 약 10 μ m, 굵기는 약 20nm이며 지름이 약 500nm인 용수철 모양으로 꼬여 있다. 이 때 한 피치는 약 2.5 μ m이며 3-4개의 피치로 이루어져 있다. 본 연구에서는 실험 및 관찰의 편의를 위하여 실제 박테리아 편모보다 약 2만배 더 큰 크기의 편모형 프로펠러를 구리선을 이용하여 제작하였다. 기본 모델의 경우 구리선의 굵기는 2mm이며 프로펠러 직경은 30mm, 피치가 70mm인 세 개의 나선으로 이루어져 있으며 전체 길이는 210mm이다. 실제 박테리아 편모의 회전속도는 약 100Hz로 알려져 있다. 이러한 수치를 기반으로 계산한 박테리아의 레이놀즈수는 약 $Re \approx 5 \times 10^{-5}$ 이다. 이러한 레이놀즈수를 큰 크기의 실험장치로 구현하기 위하여 본 연구에서는 작동 유체를 일반적인 물보다 점도가 10⁵배 큰 실리콘 오일 ($\rho \approx 977kg/m^3$, $\eta \approx 97.7N \cdot S/m^2$)을 사용하였다. 편모 모형의 회전 속도는 20rpm에서부터 50rpm까지 변경하며 측정하였으므로 레이놀즈수는 $9.33 \times 10^{-3} \sim 28 \times 10^{-3}$ 까지 변화한다고 할 수 있다. 이러한 레이놀즈수는 실제박테리아 편모의 레이놀즈수에 비하여 약 180 ~ 560배 큰 값이지만 이는 충분히 작은 값이므로 저 레이놀즈수 영역에서의 박테리아 편모형 프로펠러의 유체역학적 특징을 충분히 관찰할 수 있을 것이라 예상된다. 또한 이 실험 방법은 Kim et al.[7], Behkam and Sitti[8] 등에 의해 사용되어

진 바 있다.

실험 장치는 편모 모델을 회전 시키는 모터, 모델의 추력을 측정기 위한 스트레인게이지, 수조, 편모 모델 등으로 구성된다. 실험에 사용한 모터는 서보모터를 사용하였으며 엔코더가 부착되어 있는 모델로 모터의 위치제어를 통해 모터의 정확한 속도와 회전수를 알 수 있으며 프로펠러의 회전으로 인하여 발생하는 추력을 측정하기 위해 모터 및 프로펠러 모형을 스트레인게이지에 부착하여 실험을 하였다. 편모 모델과 모터는 편모 모델에 맞게 제작된 커플링을 이용하여 연결하였다. 수조의 경우 실리콘 오일을 담은 용도로 사용되며 이는 실리콘오일의 무게를 버티고 수조안의 유동을 관찰할 수 있도록 아크릴을 사용하여 제작하였고 수조의 크기는 가로 330mm 세로 330mm 높이 615mm 이다.

3. 토크 및 추력측정

저 레이놀즈수 영역에서의 편모형 프로펠러 형상변수의 영향을 파악하기 위해 다양한 감김수와 피치를 가지는 편모 모델을 제작하였다. 프로펠러는 서보모터(미쓰비시 HC-KFS05 3(B))을 이용하여 회전시켰으며 회전수는 최저 20rpm에서부터 50rpm까지 5rpm단위로 측정하였으며 실험의 추력은 스트레인게이지(카스 BCL-3Kgf)를 통해 나온 데이터를 변환하여 측정하였다. 토크의 경우 모터에서 나오는 신호를 오실로스코프(YOKOGAWA-DL9140L)를 이용하여 측정하였다.

편모형 프로펠러 모델의 감김수 변화에 따른 추력과 토크의 변화를 Fig. 1과 2에 각각 나타내었다. 참고로 편모형 프로펠러와 일반적인 스크류형 프로펠러의 효과를 비교하기 위하여 직경이 32 mm와 27 mm인 스크류형 프로펠러의 결과를 같이 나타내었다. Fig.1의 그래프에서 스크류형 프로펠러와 편모형 프로펠러의 추력을 비교했을 때 스크류보다 편모 모델의 추력이 더 크다는 것을 확인할 수 있었다. 본 실험의 결과는 편모 모델의 경우 가장 짧은 길이가 70mm인 반면 스크류형 프로펠러의 길이는 13mm에 불과해 두 결과를 직접적으로 비교하는 것은 무의미할 수 있다. 하지만 편모형 프로펠러의 경우 스크류형 보다 작은 직경으로 설계하여도 동일한 추력을 얻을 수 있으므로 좁은 공간을 통과하여야 하는 경우 편모형 프로펠러가 더 유리할 수 있다는 결론을 얻을 수 있다. 편모형 프로펠러의 감김수의 경우 감김수가 늘어날수록 추력 또한 커진다는 것을 확인할 수 있었다. 감김수가 1에서 2로 늘어날 때와 2에서 3으로 늘어날 때 증가하는 추력의 크기는 회전 속도가 일정하면 거의 동일하였으며 회전 속도가 증가할수록 추력 또한 직선적으로 증가하였다. Fig.2의 토크의 그래프도 추력의 그래프와 마찬가지로 비슷한 추세로 그래프가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

피치의 영향을 알아보기 위하여 전체 길이를 고정시키고 피치를 변화 시켜가며 실험을 수행하여 Fig.3과 4에 나타내었다. 그래프에서 알 수 있듯이 프로펠러의 전체길이가 같을 때 피치가 70mm인 경우 추력이 가장 크게 측정되었으나 52.5mm와 105mm인 경우 70mm인 경우와 크게 다르지 않은 것을 관찰할 수 있었다. 하지만 피치가 35mm이며 감김수가 6인 모델의 경우 다른 세 모델과는 다르게 추력이 뚜렷하게 작은 것을 관찰할 수 있었다. 피치가 35mm이고 감김수가 6인 모델의 경우 토크 또한 가장 큰 것으로 관찰되어(Fig. 4) 추력은 작고 토크는 크므로 사용한 모델 중 가장 비효율 적인 것으로 파악 되었다. 추력이 비슷한

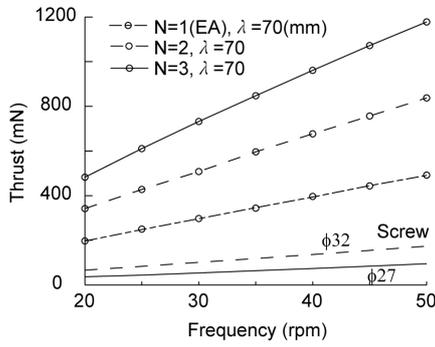


Fig. 1 Generated thrust by helical propeller with various number of waves

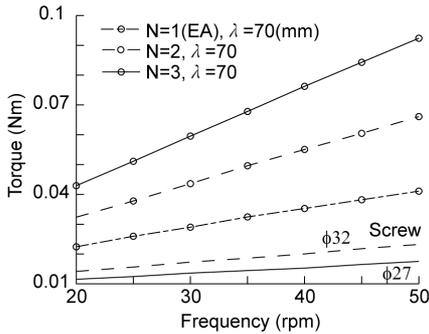


Fig. 2 Generated torque by helical propeller with various number of waves

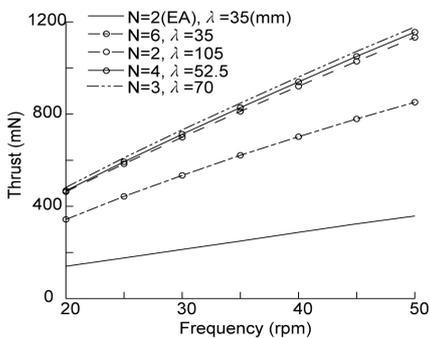


Fig. 3 Generated thrust by helical propeller with various pitch

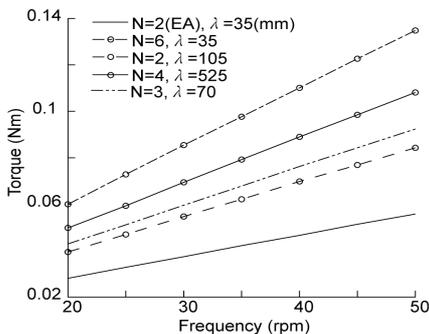


Fig. 4 Generated torque by helical propeller with various pitch

세 모델 (피치 길이 105, 70, 52.5mm)의 경우 토크는 감김수가 적을수록 작은 것을 관찰할 수 있었으며 이 경우 추력은 거의 비슷하기 때문에 감김수가 가장 적은 105mm 모델이 상대적으로 적은 토크로 큰 추력을 얻어낼 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 유통가시화

회전하는 편모형 프로펠러 주위의 유동을 PIV장비를 이용하여 가시화 하는 동시에 속도 분포를 측정하였다. Fig. 5의 중앙 일부분의 경우 속도 벡터가 비어 있으나 이것은 프로펠러의 그림자로 인하여 발생하는 현상이다. 속도 분포를 관찰한 결과

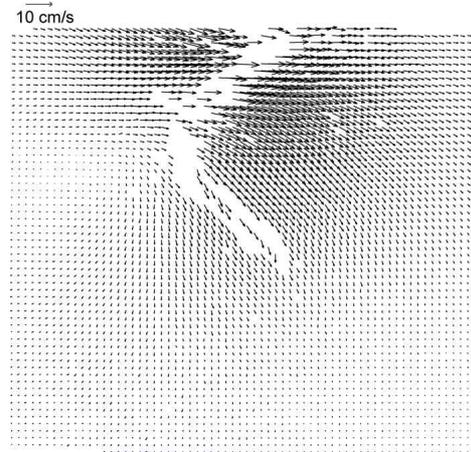


Fig. 5 Velocity field around rotating helical propeller

프로펠러의 길이방향 보다 원주방향으로 상대적으로 빠른 속도로 유동이 존재하는 것을 알 수 있었다. 이는 피치가 짧을수록 더 클 것이라 예상 할 수 있으며 이러한 현상 때문에 피치가 짧을수록 토크대비 추력이 작은 것이라 설명할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 저 레이놀즈수 영역에서 편모형 프로펠러 형상이 추력 및 토크 발생에 미치는 영향을 알아보기 위하여 감김수, 피치, 모터의 회전 속도 등을 다양한 변화시켜 가며 추력 및 토크를 측정하였다. 프로펠러의 회전수 및 감김수가 증가함에 따라 추력 및 토크의 크기가 직선적으로 증가하였으며 전체 길이가 일정할 때 피치가 길 수록 적은 토크로 큰 추력을 얻어낼 수 있었다. 또한 PIV 장비를 이용하여 편모 형상의 프로펠러 회전시에 모형의 유동장을 측정하여 편모형 프로펠러 주변의 유동장을 관찰 할 수 있었다.

후기

이 논문은 2009년도 한국과학재단의 지원을 받아 연구되었습니다(2009-0071117).

참고문헌

1. Barthlott, W., Neinhuis, C., "Purity of the Sacred Lotus, or Escape from Contamination in Biological surfaces," *Planta*, 202, 1-8, 1997.
2. Berwaerts, K., Vandyck, H., Aerts, P., "Does Flight Morphology Relate to Flight Performance? An Experimental Test with the Butterfly *Pararge Aegeria*," *Functional Ecology*, 16, 484-491, 2002.
3. Song, A., Tian, X., Israeli, E., Galvao, R., Bishop, K., Swartz, S., Breuer, K., "Aeromechanics of Membrane Wings with Implications for Animal Flight," *AIAA Journal*, 46, 2096-2106, 2008.
4. Hu, D. L., Chan, B., Bush, W. M., "The Hydrodynamics of Water Strider Locomotion," *Nature*, 424, 663-666, 2003.
5. Lauder, V. G., Maden, G. A., "Fish Locomotion: Kinematics and Hydrodynamics of Flexible Foil-like Fins," *Experiments in Fluids*, 43, 641-653, 2007.
6. Kim, M. J., Kim, M. J., Bird, J. C., Park, J., Powers, T. R., Breuer, K. S., "Paicle Image Velocimetry Experiments on a Macro-scale Model for Bacterial Flagellar Bundling" *Experiments in Fluids*, 37, 782-788, 2004.
7. Behkam, B., Sitti, M., "Design Methodology for Biomimetic Propulsion of Miniature Swimming Robots," *Journal of Dynamic System, Measurement, and Control*, 128, 36-43, 2006.