

## 점성유체 중에 회전하는 스프링의 추진적 거동에 관한 수치해석 모델

최원열\* · 서용권\* · 강상모\*\*

\* 동아대학교 기계공학과

### Numerical Model of Propulsive Behavior of a Rotating Spring in Viscous Fluid

Won Yeol Choi\*, Yong Kweon Suh\*, Sangmo Kang\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Dong-A Univ.

(Received December 17, 2014 ; Revised March 30, 2015 ; Accepted April 18, 2015)

**Key Words:** Propulsion(추진), Flagellar Motion(편모 운동), Numerical Simulation(수치 모사), Propulsive Speed(추진 속도), Rotary Motion(선회 운동)

**초록:** 본 논문에서는 박테리아 편모를 모사한 스프링 모델을 이용하여 박테리아의 편모의 추진적 거동에 관한 연구를 수행하였다. 본 해석에서는 상용프로그램을 사용하였으며, 별도의 회전영역 설정에 따른 수치기법의 타당성 확인과 더불어 파라미터 연구를 수행하였다. 수치해석 결과는 전반적으로 Resistive force theory와는 잘 일치하지 않았지만, Slender body theory와는 잘 일치하였다. 그리고 스프링의 회전속도, 피치, 나선반경 및 유체의 점성의 영향을 확인하였다. 또한 벽과의 거리에 따른 효과도 분석하였다.

**Abstract:** In this paper, we study the propulsive behavior related to the flagellar motion of bacteria using a spring model. A commercial program was used to conduct simulations, and we verified the numerical technique by setting an additional rotating domain and conducting a parametric study. The numerical results are in good agreement with slender-body theory, although overall, they are not in agreement with resistive-force theory. We confirm the effect of the rotational velocity, pitch, helical radius, fluid viscosity, and, in particular, the distance from the wall on the propulsion of the spring.

### 1. 서론

수 백 만년이 넘도록 지구상의 생체들은 생존하기 위해 환경에 적응해 왔으며 그 적응 과정을 통하여 각각의 환경에서의 최적의 외형구조와 행동패턴을 찾아내었다. 생체모방공학(biomimetics)이란 이러한 생체가 가지고 있는 다양한 기능을 이용하여 기존에 해결하지 못하였거나 생각하지 못한 문제를 해결하고자 하는 접근 방법이다. 생체모방공학이 응용된 사례는 옷에 붙어있는 씨앗의 표면으로부터 아이디어를 얻어 개발한 벨크

로(velcro)나 상어의 거친 표면 구조를 응용한 전신 수영복, 홍합이 바위에 붙을 때 분비되는 고분자 단백질 구조를 응용한 수술용 접착체에 이르기까지 폭 넓은 분야에서 다양하게 연구되고 있다. 최근에는 박테리아의 한 종류인 대장균(escherichi coli)의 편모도 생체모방공학적 측면에서 소형 유행로봇을 추진시키는 추진체와 관련하여 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>(1)</sup>

박테리아는 미생물 중에서 구조가 가장 간단하고 원시적이면서 가장 고효율의 추진체를 가지고 있다. 그리고 박테리아는 세포 바디에 내장된 작은 모터와 같은 역할을 하는 나선형 모양의 기관이 회전하여 박테리아가 움직이게 된다. 그리고

† Corresponding Author, kangsm@dau.ac.kr  
© 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

그 기관을 편모라고 부른다.<sup>(2,3)</sup> 따라서 박테리아는 편모에 의한 회전운동을 통해서 추진을 한다.

과거 많은 연구자들에 의해 회전 스프링의 Resistive force theory(RFT)와 Slender body theory(SBT)가 정립되었다. RFT에서는 스프링의 추진력과 토크가 스프링의 국부적 요소에 가해지는 접선방향 및 수직방향의 힘을 적분함으로써 구해지며, 항력계수를 구하는 식들은 여러 연구자들에 의해 제안되어져 왔다. SBT에서는 스프링의 표면을 스톡슬릿(Stokeslet)과 더블릿(doublet)의 분포로 대체하고 관련 계수들을 적분방정식을 풀어서 구한 뒤에 스프링에 가해지는 힘과 토크를 계산하는 방법을 사용한다.<sup>(4-6)</sup>

본 논문에서 연구목적은 편모를 모사한 스프링 모델을 이용하여 박테리아의 추진 메커니즘을 이해하고 어떤 거동을 하는지 규명하는 것이다. 즉, 수치해석을 통해 스프링의 피치, 회전속도, 나선반경, 유체의 점성계수 및 벽과의 거리에 따른 추진력 및 추진속도의 변화를 예측하고 스프링의 거동을 분석하고자 한다.

## 2. 유동모델 및 수치해석 방법

### 2.1 유동모델

해석 대상은 박테리아 편모를 모사한 스프링 모델이다. Fig. 1은 상용 프로그램인 Solid Works 2013을 이용하여 3D 형상으로 나타낸 것이다. 이 스프링은 원나사이고 추진 방향은 그림에서 화살표 방향이며 추진 방향에서 볼 때 시계방향으로 회전한다. 여기서  $L$ 은 축방향 길이,  $\lambda$ 는 스프링의 피치,  $r$ 은 스프링의 반지름, 그리고  $R$ 은 나선반지름이다.

본 연구에서 레이놀즈수는

$$Re = \frac{\omega \lambda^2 \rho}{\mu} \tag{1}$$

로 정의되었다.<sup>(5)</sup> 여기서  $\omega$ 는 스프링의 회전속도,  $\rho$ 는 유체의 밀도, 그리고  $\mu$ 는 유체의 점성계수이다. 본 연구에서 레이놀즈수는  $10^{-3} \sim 10^{-5}$ 의 범위이므로 스톡스 유동(Stokes flow)의 특성을 가지게 된다.

Table 1은 스프링의 치수<sup>(4)</sup>를 나타낸 것이다. 본 연구에서 가장 중요한 영향을 주는 파라미터는  $R$ 과  $\lambda$ 이다.

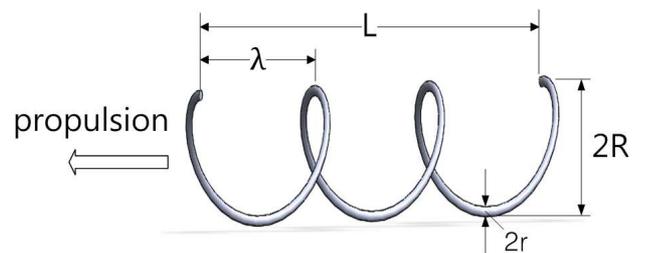
Table 2는 상사성 법칙을 이용한 원형과 모델의 치수<sup>(5)</sup>이다. 모델의 밀도를 보면  $50 \text{ kg/m}^3$  로

**Table 1** The geometric size of the spring model

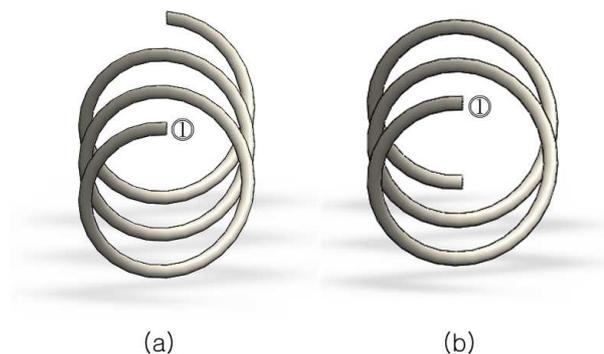
$L$	200 mm
$\lambda$	66 mm
$R$	12.7 mm
$r$	1 mm

**Table 2** Dimensions of the prototype and model, the latter being determined through similitude

	prototype	model
$L$	10 $\mu\text{m}$	200 mm
$\mu$	0.01 Pa·s	100 Pa·s
$\omega$	314 rad/s	1.57 rad/s
$\rho$	1000 kg/m <sup>3</sup>	50 kg/m <sup>3</sup>



**Fig. 1** Numerical model of a spring mimicking a flagellum



**Fig. 2** Two kinds of spring models under study with different number of turns,  $n$ : (a)  $n = 3$ , (b)  $n = 2.5$

설정하였는데 이런 유체는 세상에 존재하지 않는다. 하지만 시뮬레이션에서는 가상적으로 설정하여 해석이 가능하기 때문에 레이놀즈수를 낮추기 위해서 다음과 같은 치수를 사용하였다. 물론 밀도 대신 점성계수를 높여서 사용해도 무방하다.

Fig. 2는 스프링 권수가  $n = 3$ 일 때와  $n = 2.5$

일 때의 스프링 형상이다. 기본 파라미터 해석에서는  $n = 3$ 인 스프링(Table 1)을 사용하였다. 추진 속도 해석에서는  $n = 2.5$ 인 스프링을 사용하였으며, 피치가 동일하므로 전체 피치길이( $L$ )가 조금 짧은 형태이다. 본 연구에서 레이놀즈수를 위한 대표길이는 식 (1)에서 보는 바와 같이 피치를 사용하므로 레이놀즈수는  $n$ 과 무관하다. 이렇게 서로 다른 두 가지 권수를 사용하는 이유는 제 3절에서 다른 바와 같이 스프링의 끝단 효과가 달라 나타나기 때문이다.

2.2 격자 생성

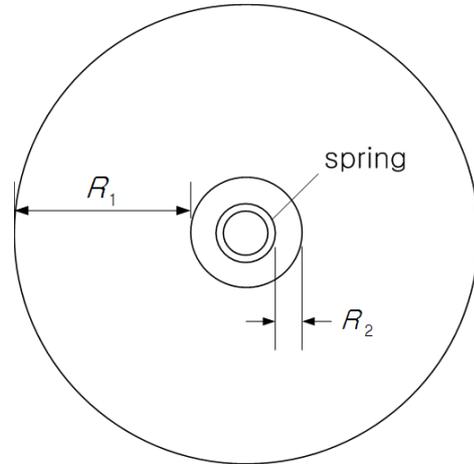
해석 대상은 박테리아를 모사한 스프링 영역과, 영역 전체가 회전하는 회전 영역, 그리고 정지해 있는 정지 영역 등 3가지 영역으로 구분된다. 해석 대상 모델의 기하학적 형상 및 해의 특성에 따라 수치해의 신뢰성을 확보하기 위해 격자의 형태, 격자의 조밀도 등을 신중히 고려해야 한다.

격자의 생성을 위해서 격자 생성 프로그램인 Ansys-Mesh를 사용하였다. 스프링의 상당한 곡률로 인해 사면체 격자를 생성 하였으며 회전영역과 정지 영역을 인터페이스 처리를 통해 서로 계산 값이 공유 되도록 하였으며, 벽면에는 정밀한 해를 얻기 위해 벽 근처에 layer를 생성 하였다. 격자의 수는 많을수록 정확도가 높을 수 있으나 필요 이상의 격자가 있을 경우 많은 격자 생성 시간과 계산시간을 소비하게 된다. 따라서 본 해석에 있어서 격자의 집중도와 격자수를 조절하여 추진력 값이 일정하게 유지되는지를 확인하고 격자수를 결정하였다.

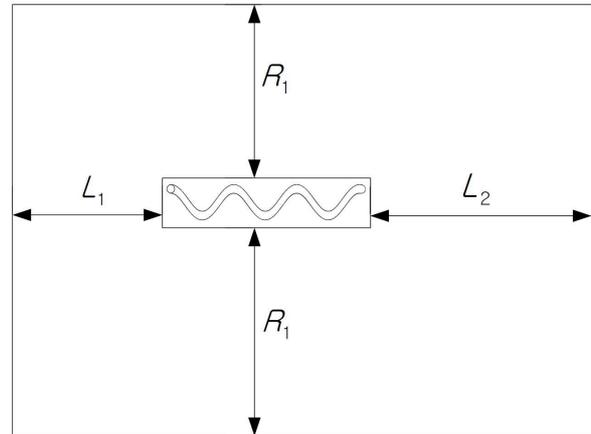
Table 3은 Table 1에서 제시한 스프링 모델을 사용하여 격자민감도를 테스트한 결과이다. 격자수에 따라 비슷한 추진력의 값을 얻었고 본 연구에서는 case 2의 격자계를 선택하여 사용하였다.

**Table 3** The grid-sensitivity test for the spring model of Table 1: Effect of the grid size, i.e., the number of nodes and elements used in the simulation, on the propulsive force for three cases

	nodes	elements	F(N)
Case 1	449901	2075923	0.22042
Case 2	888458	3720234	0.21999
Case 3	1563092	7257469	0.21824



(a) Front view



(b) Side view

**Fig. 3** The concentric model: (a) front view, (b) side view

2.3 해석 방법

Fig. 3(a)는 동심원 모델의 정면도를 나타낸 그림이다. 스프링의 피치, 나선의 반지름, 스프링의 회전속도, 유체의 점성계수에 관한 파라미터 연구에 사용되어진 모델이다.  $R_1$ 은 회전 영역과 정지영역까지의 거리이고  $R_2$ 는 스프링 끝과 회전 영역까지의 거리를 나타낸다. 여기서  $R_1$ 은 400 mm,  $R_2$ 는 10mm로 설정 하였다. Fig. 3(b)는 수치해석 모델의 측면도를 나타낸다.  $L_1$ 은 입구와 회전영역 간의 거리를 나타내며,  $L_2$ 는 출구와 회전영역간의 거리를 나타낸다. 여기서  $L_1$ 은 400 mm,  $L_2$ 는 600mm로 설정하였다. 여러 개의 정지영역의 도메인을 생성 하여 해석해 본 결과  $R_1$ 의 길이에 따라 추진력이 거의 변화가 없는 최적의 크기를 찾을 수 있었다. 그래서 벽효과가

거의 작용하지 않는 무한대에 위치해 있다고 가정할 수 있었다.

본격적인 파라미터 연구를 위해 스프링의 기본적인 치수는 위와 같이 고정시켰으며, 총 4개의 파라미터를 설정하였다. 첫 번째는 스프링의 피치의 변화에 따른 추진력이다. 축방향 길이가 200mm, 나선의 반지름이 12.7mm로 고정된 상태에서 스프링의 피치를 11mm ~ 121mm 까지 일정한 간격으로 증가 시켜 가며 추진력의 크기를 계산하였다. 두 번째 파라미터는 나선의 반지름이다. 마찬가지로 축방향 길이는 고정하고 피치는 66mm로 고정하였다. 그리고 나선의 반지름을 12.7mm, 17.7mm, 22.7mm 그리고 27.7mm로 변경해 가면서 추진력을 구하였다. 세 번째는 스프링의 회전속도 변화에 따른 추진력의 계산이다. 축방향의 길이 200mm, 피치 66mm, 나선의 반지름 12.7mm로 고정 시키고 스프링의 회전 속도를 1.57 ~ 4.71 rad/s 증가 시켜 가며 추진력 데이터를 획득하였다. 네 번째는 유체의 점성계수이다. 세 번째와 마찬가지로 축방향의 길이, 스프링의 피치, 나선의 반지름을 고정시키고 이번에는 유체의 점성계수를 변화시켰다. 그리하여 점성계수를 10 ~ 30 Pa·s의 범위 내에서 5Pa·s 씩 증가 시키면서 추진력을 계산하였다.

Fig. 4(a)는 벽과의 거리와 추진력 및 추진속도 연구 사용된 직사각형 모델의 정면도이고, Fig. 4(b)는 직사각형 모델의 측면도이다.  $L_1$ 은 길이 400mm,  $L_2$ 의 길이 600mm, 그리고  $L_3$ 의 길이 800mm이다. 벽의 거리와 추진력과의 관계를 알아보기 위해 스프링과 벽과의 거리( $H$ )를 30 ~ 810mm 까지 변화 시켜 가면서 추진력과 추진 속도를 계산하였고, 벽으로부터 810mm와 30mm 위치에서 스프링을 90°, 180°, 270° 회전 시킨 후 동일한 해석을 반복하였다. 마지막으로 벽 근처에서의 속도와 벽에서 멀리 떨어져 있을 때의 속도를 비교하였다.

#### 2.4 전처리 및 경계 조건

본 연구에서는 수치해석 전용 프로그램인 ANSYS CFX V13.0을 이용하였다. 층류 유동이기 때문에 난류 모델은 적용되지 않았고, 사용된 작동 조건으로는 작동 유체는 밀도 50 kg/m<sup>3</sup>를 가지고 동점성계수가 100 Pa·s인 유체를 생성하여 사용 하였으며, 스프링의 회전 속도는 1.57 rad/s로 설정하였다. 입구와 출구 제외한 벽은 모두

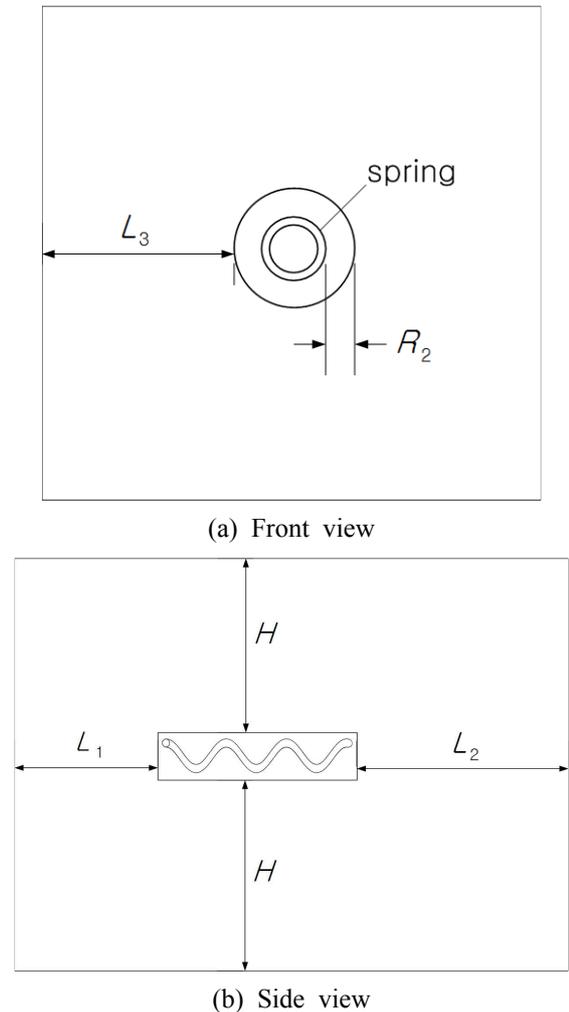


Fig. 4 The rectangular model: (a) front view, (b) side view

점착조건(no-slip condition)을 적용하였다. 스프링의 회전영역(rotating domain)과 바깥 외부 정지영역(stationary domain)으로 구분하여 전체영역을 설정하였다. 해석을 위한 경계 조건으로는 입구면과 출구면에는 압력을 0으로 두었다.

파라미터 연구를 위해 사용된 모델에서도 위와 같은 전처리 조건이 사용되었다. 그러나 추진 속도를 찾기 위한 모델에서는 외부 정지영역의 6개의 면에 속도를 부여하여 전체 힘이 0이 되는 속도를 찾았다. 나머지 조건은 동일하다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 기본 파라미터 변화의 영향

Fig. 5는 추진력과 스프링의 피치와의 영향을 나타내는 그림이다. 본 연구에서 획득한 수치해석 결과와 Resistive Force Theory(RFT), Slender

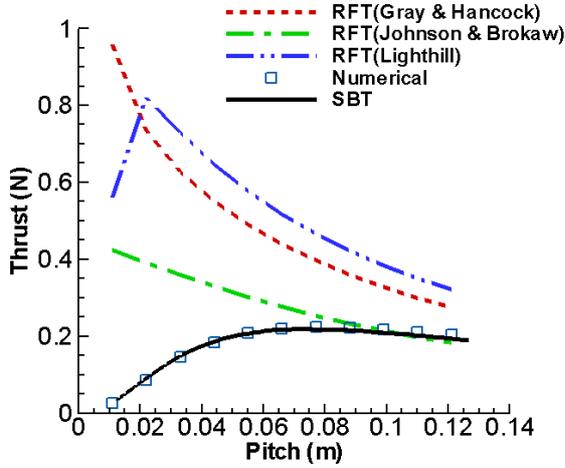


Fig. 5 Effect of the pitch on the thrust

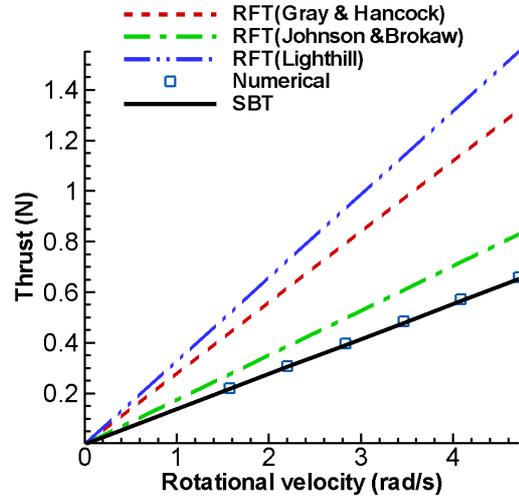


Fig. 7 Effect of the rotational velocity on the thrust

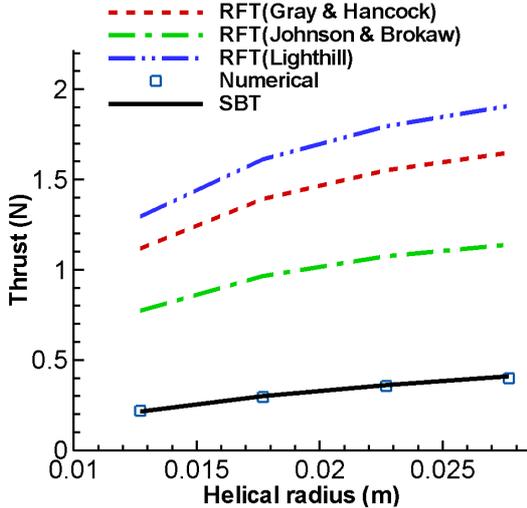


Fig. 6 Effect of the helical radius on the thrust

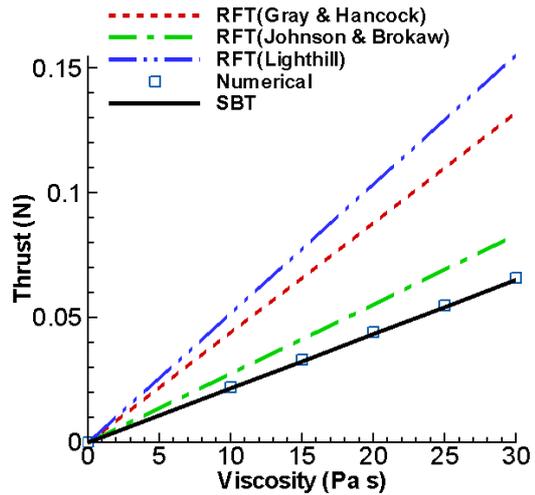


Fig. 8 Effect of the viscosity on the thrust

Body Theory(SBT)의 해석 결과를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 RFT의 경우 피치가 작을수록 추진력이 증가하는 경향을 보인다. 특히 Lighthill에 정의된 RFT(dash-dot-dot line)의 경우 피치가 0으로 갈수록 증가하다가 어느 시점에 갑자기 급하게 감소하는 경향을 보이는데 이는 RFT에서 정의된 항력계수를 보면 로그함수가 포함 되어있는데 이 값이 1 이하가 되면 마이너스 값을 가지게 된다. 따라서 Gray & Hancock (dashed line)와 Johnson & Brokaw(dash-dot line)에 의해 각각 정의된 RFT는 아마도 피치가 0인 부근에서 갑자기 감소하는 그래프가 될 것이다. 이는 RFT는 스프링의 피치 사이에서 발생하는 유동의 유체역학적인 관계를 무시했기 때문이다.<sup>(6)</sup> SBT는 피치가 커짐에 따라 증가하다가 조금씩

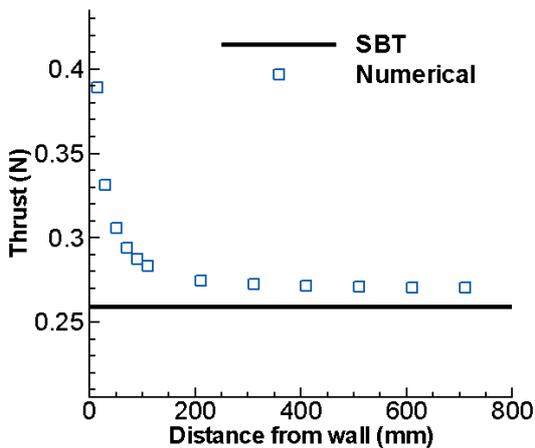
감소하는 경향을 보인다. 수치해석 결과는 RFT와 일치하지 않았으나,<sup>(7)</sup> SBT와는 거의 일치하는 것을 알 수 있었다. 그리고 수치해석 결과에서 피치가 77mm일 때, 추진력이 가장 크게 나타나는 것을 확인하였다.

Fig. 6은 추진력과 나선의 반지름의 관계를 나타내는 그림이다. RFT와 SBT 모두 비슷한 경향을 보여준다. 그러나 그림과 같이 수치 해석 결과는 RFT보다는 SBT와 더 잘 일치한다.

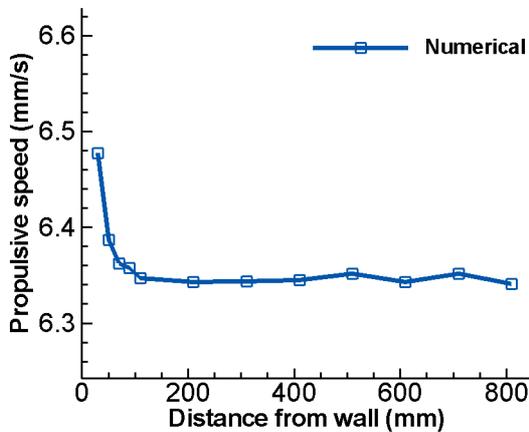
Fig. 7은 스프링의 회전 속도와 추진력과의 관계이다. 이론적으로 층류 유동에서 속도와 힘의 관계는 선형성을 가지기 때문에 직선의 형태를 띤다. 따라서 그림과 같이 RFT와 SBT 모두 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 것이 타당하며,

**Table 4** Spring's velocity components versus distance from the wall

<i>H</i> (mm)	<i>u</i> (mm/s)	<i>v</i> (mm/s)	<i>w</i> (mm/s)
15	- 0.2823	- 2.530	6.792
30	- 0.07489	- 2.657	6.478
50	- 0.02148	- 2.773	6.387
70	- 0.00866	- 2.844	6.362
90	0.001088	- 2.891	6.358
110	0.003444	- 2.915	6.347
210	0.009083	- 2.964	6.343
310	0.009317	- 2.974	6.344
410	0.006985	- 2.976	6.345
510	0.004779	- 2.978	6.351
610	0.00202	- 2.975	6.343
710	0.0000	- 2.978	6.351
810	- 0.00136	- 2.976	6.341



(a) Thrust



(b) Propulsive speed

**Fig. 9** Effect of the wall on the (a) thrust and (b) propulsive speed

수치해석 결과는 RFT보다는 SBT에 더 정확히 일치하였다.

Fig. 8은 추진력과 유체의 점성계수와의 관계를 나타내는 그림이다. 이 또한 층류유동에서 유체의 점성계수와 힘과의 관계는 선형적이므로 위 스프링의 회전속도의 경우와 마찬가지로 직선의 형태를 가진다. 그림에서 RFT, SBT 모두 선형적으로 증가하고 마찬가지로 수치해석 결과는 RFT보다 SBT가 더 정확히 일치하였다.

3.2 벽면 근접 효과

Fig. 9(a)는 추진력의 벽효과에 관한 그림이다. 스프링과 벽과의 거리 변화에 따른 추진력의 크기를 보여준다. 스프링이 벽 근처에 가까이 근접할수록 추진력이 포물선 모양으로 증가한다. 따라서 벽과의 거리가 810mm일 때를 벽효과가 거의 없다고 가정 했을 때 수치해석 결과와 SBT 결과를 비교하였을 때 약 5% 미만의 차이를 보였다. 그리고 벽과의 거리가 가장 가까운 15mm 일때의 경우 수치해석 결과는 SBT의 결과보다 대략 44% 증가를 보였다.

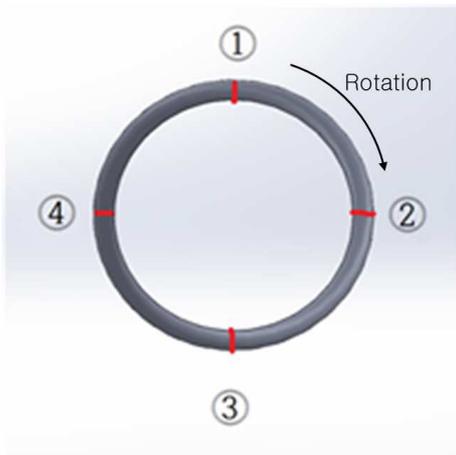
Fig. 9(b)은 스프링의 추진속도와 벽과의 거리에 관한 상관관계이다. 벽에서 가까워질수록 속도가 약간 증가하긴 하나 그 증가폭이 매우 작으며, 벽과의 거리가 멀어질수록 추진속도는 거의 일정하다는 것을 알 수 있다. 그 이유는 추진력이 벽 근처에서 증가하지만 추진을 방해하는 힘 또한 증가하기 때문에 상쇄가 되어 추진 속도가 조금 증가하였다. 벽 부근에서 추진력의 증가폭에 비해 추진 속도의 증가폭은 작았다.

Table 4는 벽과의 거리에 따른 속도벡터와 스프링의 회전에 의한 힘을 나타낸다. 여기서는  $n = 2.5$ 인 스프링 모델이 사용되었다(Fig. 2(b)).

먼저,  $u$ 속도는 810mm에서 90mm까지는 거의 0에 가까운 값을 가지다가 70mm에서 15mm사이에서는 속도가 증가함을 볼 수 있다. 그 이유는  $x$ 방향으로는 엔드효과가 적용되는데 벽에서 멀리 떨어져 있을 때는 엔드효과에 의해 서로 상쇄가 되다가 벽 부근에서는 벽면 구속에 의해 힘의 불균형이 일어나고 벽에서 가까운 쪽의 엔드가 더 큰 힘을 받는다. 그 위치가 바로 스프링이 시작되는 위치이다. 반면에 스프링이 끝나는 위치는 시작 위치에 비해 멀리 떨어져 있다. 또 다른 이유는 스프링의 표면적과 관련이 있다. Fig. 3(b)에서  $x$ 방향인 가로로 잘랐을 때 위와 아래로

**Table 5** Dependence of the spring's instantaneous velocity components on the distance from the wall and spring's rotational phase

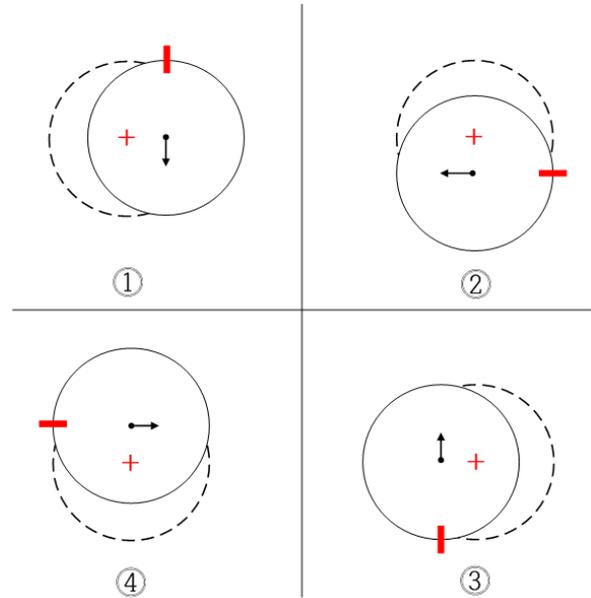
$H$ (mm)	phase	$u$ (mm/s)	$v$ (mm/s)	$w$ (mm/s)
30	①	-5.88E-02	-2.0859	5.0848
	②	-2.234	-1.77E-04	5.1191
	③	-5.74E-02	2.0857	5.0787
	④	2.2167	-3.22E-04	5.0380
810	①	-9.26E-04	-2.3357	4.9774
	②	-2.337	-4.82E-04	4.9860
	③	-1.35E-04	2.336	4.9780
	④	2.3383	2.14E-04	4.9829



**Fig. 10** Four phases of the spring motion during rotation. Each number represents the instantaneous position of the spring end located on the viewer side

나뉘게 되는데 서로의 표면적은 같다. 하지만 스프링의 위쪽부분이 벽에 더 가깝기 때문에 힘이 아래쪽 면에서의 힘보다 더 크게 작용하고 그 방향은 왼쪽방향이다. 따라서 속도는 (-)방향을 가지고 점점 커지는 것이다.<sup>(8)</sup>

$v$ 속도는 벽면으로 갈수록 힘은 증가하지만 속도는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 스프링은 힘이 생기는 방향으로 정속운동을 한다. 따라서 전체 힘은 0이다. 벽과 멀리 떨어진 경우에는 유체가 스프링 주위를 많이 돌아서 지나가기 때문에 힘은 작다. 그렇지만 나아갈려는 그 힘을 상쇄시키는 유체의 힘은 커야한다. 그러나 벽 근



**Fig. 11** Time sequence of four instantaneous configurations of the spring referred to the time-averaged shape(dashed circle) during one revolution of the spring

처에서는 벽면 구속에 의해 주위 유체가 스프링 주위를 전자에 비해 덜 돌아서 지나가기 때문에 힘이 크다. 따라서 그 힘을 상쇄시키려는 유체의 힘은 작다. 즉, 같은 속도를 부여하였을 때 벽과의 거리가 먼 경우는 유체가 가하는 힘이 작고, 벽 부근에서는 유체가 가하는 힘이 크다. 따라서 벽 근처에서 정속운동 하기 위한 속도는 벽에서 멀리 떨어진 경우보다 느리다.

$w$ 속도에 대해서는 다음과 같이 설명 할 수 있다. 스프링은 벽면 가까이에서는 추진력이 증가한다(Fig. 9(a)). 추진력은 스프링 회전 때문에 생기는 힘인데 그것은 스프링 회전에 대한 상대유체가 반대로 가기 때문에 생기는 힘이다. 그러나 벽면에서는 벽면의 구속에 의해서 상대적으로 강한 힘이 생긴다. 추진력에 상응하는 스프링의 운동으로 인해 생기는 힘 또한 벽면에 가까이 가면 같은 속도에 대해서도 큰 힘이 생긴다. 그래서 벽면에 가까이 있을 때 속도의 크기는 판단할 수 없다.

3.3 스프링 축의 선회운동

Fig. 10는 스프링 모델을 관찰자 입장에서 정면에서의 끝단의 위치를 나타낸다. 즉, ①은 Fig. 2(b)에서 ①이라고 표시된 부분이다. Table 5는 시작위치 ①, ②, ③, ④에서 벽에서 가까울 때(30

mm)와 벽에서 멀리 있을 때(810mm)  $u$ ,  $v$ ,  $w$  속도를 나타낸다. 그리고 Fig. 11은 스프링이 1회전 시 각 순간에서의 위치를 나타낸다.

스프링이 벽에서 810mm일 때 스프링은 Table 4의 노란색 부분의 속도들이 크기는 같고 방향만 다르다. 그리고 그 방향을 분석해 보면 Fig. 10에서 스프링의 궤적이  $z$ 축으로부터 시계방향으로 움직인다. 그리고 그 속도들의 크기가 같기 때문에 원형의 궤적을 그리며 진동한다.<sup>(9)</sup> 그러나 스프링이 벽으로부터 30mm일 때 스프링은 회색 부분에서 보듯이 속도의 방향은 810mm인 경우와 같으나 그 크기가 다르다. 이는 스프링의 궤적이 벽 근처에서는 원형의 궤적이 아닌  $x$ 축 방향이 넓은 타원형의 궤적을 그린다. 따라서 스프링은 스프링의 회전운동에 의해 벽에서 가까울 때는 타원형 궤적을, 벽에서 멀리 위치했을 때에는 원형 궤적으로 그리며 진동하면서 추진한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 수치해석을 통해서 스프링의 파라미터 연구 및 추진속도에 대해 분석하였다. 결론을 정리하면 다음과 같다.

(1) 수치해석 결과는 resistive force theory(RFT)와는 잘 일치하지 않았지만 slender body theory(SBT)와는 잘 일치하였다.

(2) 스프링이 벽 근처에 있을 때는 추진력이 급격히 증가함을 확인하였다.

(3) 스프링은 벽으로부터 멀리 떨어진 위치에서는 원형 궤적을 그리며 진동하며 추진하고, 벽에서 가까운 위치에서는 타원형 궤적을 그리며 진동하며 추진한다.

#### 후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제(No. 20134010200550)입니다.

#### 참고문헌 (References)

- (1) Cho, J. H. and Jin, S. W., 2012, "Flow Visualization of Rotating Flagellar Propeller near Solid Boundary," *Proc. KSME Autumn Conf.*, pp. 1654~1657.
- (2) Ranjith, M., 2012, "Numerical Study on Bacterial Flagellar Motion and Bundling Using an Immersed Boundary Method," Ph. D Dissertation Submitted to the Graduate School, Dong-A University, Korea.
- (3) Sowa, Y. and Berry, R. M., 2008, "Bacterial Flagellar Motor," *Q. Rev. Biophys.*, Vol. 41, No. 2, pp. 103~132.
- (4) Choi, W. Y., 2014, "Numerical Study on the Propulsion and Flow Field of the Spring Mimicking a Flagellum of Bacteria," M. S. Thesis Submitted to the Graduate School, Dong-A University, Korea.
- (5) Kumar, M. S. and Philominathan, P., 2011, "Computational Fluid Dynamics Modeling Studies on Bacterial Flagellar Motion," *IJFMS*, Vol. 4, No. 3, pp. 341~348.
- (6) Rodenborn, B., Chen, C-H, Swinney, H. L., Liu, B. and Zhang, H. P., 2013, "Propulsion of Microorganisms by a Helical Flagellum," *PNAS*, Vol. 110, No. 5, pp. E338-E347.
- (7) Gowtham, B., 2013, "Study on the Behavior of Needles and Springs Falling Freely in a Viscous Fluid," M. S. Thesis Submitted to the Graduate School, Dong-A University, Korea.
- (8) Lauga, E., Diluzio, W. R., Whitesides, G. M. and Stone, H. A., 2006, "Swimming in Circles: Motion of Bacteria near Solid Boundaries," *Biophys. J.*, Vol. 90, No. 1, pp. 400~412.
- (9) Goto, T., Nakata, K., Baba, K., Nishimura, M. and Magariyama, Y., 2005, "A Fluid-Dynamic Interpretation of the Symmetric Motion of Singly Flagellated Bacteria Swimming Close to a Boundary," *Biophys. J.*, Vol. 89, pp. 3771~3779.