

< 논문 >

물 위에 사는 곤충의 부양과 가라앉음에 관한 연구

이 덕 규* · 김 호 영†

(2006년 5월 18일 접수, 2006년 8월 18일 심사완료)

Study on the Floating and Sinking of Insects Living on Water

Duck-Gyu Lee and Ho-Young Kim

Key Words: Flotation(부양), Sinking(가라앉음), Surface Tension(표면장력), Insects(곤충), Biomimetics (생체모방공학)

Abstract

It is well known that the surface tension forces can make a particle denser than water float when the size of the particle is of the order of 1 mm. This is deeply related to the basic mechanism enabling small insects to wander around on the pond surface and also to a newly emerging technology of self-assembly using capillary forces. For the quantitative understanding of this effect, we experimentally study the maximum density of a cylinder that can float on water and how fast the cylinder sinks when the density exceeds the maximum value. We compare our experimental results with the theoretical prediction and find good agreement between them.

기호설명

B : Bond 수($= \rho g r_o^2 / \gamma$)
 D_{max} : 실린더의 최대 비중
 F_{net} : 실린더에 작용하는 단위 길이 당 알짜 힘(N/m)
 F_p : 실린더에 작용하는 단위 길이 당 부력(N/m)
 $\overline{F_p}$: F_p 의 무차원수
 $F(t)$: 베르누이 상수
 g : 중력가속도(m/s^2)
 h : 수면의 위치(m)
 h_o : 실린더 중심의 위치(m)
 \dot{h}_o : 실린더의 속도(m/s)
 \ddot{h}_o : 실린더의 가속도(m/s^2)

l_c : 모세관 길이($= (\gamma / \rho g)^{1/2}$)(m)
 P : 무차원 압력($= p t_c^2 / \rho l_c^2$)
 p : 압력(N/m²)
 p_a : 대기 압력(N/m²)
 r_o : 실린더의 반지름(m)
 t_c : 특성 시간($= (\gamma / \rho g^3)^{1/4}$)
 β : 실린더의 중심축과 실린더와 수면의 접촉점이 이루는 각(rad)
 γ : 표면장력계수(N/m)
 Φ : 속도 포텐셜(m²/s)
 ϕ : 실린더와 수면의 접촉점에서 수면의 접선과 x축이 이루는 각(rad)
 ψ : β 와 같은 방향의 각을 나타내는 좌표(rad)
 ρ : 물의 밀도(kg/m³)
 ρ_s : 실린더의 밀도(kg/m³)

* 회원, 서울대학교 대학원 기계항공공학부

† 책임저자, 회원, 서울대학교 기계항공공학부

E-mail : hyk@snu.ac.kr

TEL : (02)880-9286 FAX : (02)880-9287

1. 서론

최근 몇 년 동안 소금쟁이와 관련된 많은 연구

가 진행되었다. Hu 등은⁽¹⁾ 소금쟁이는 수면에 물 결과를 만들어 그 반작용으로 앞으로 추진한다는 기존 소금쟁이의 추진 원리를 뒤엎고, 입자 추적법(particle tracking method)을 사용하여 실제 소금쟁이는 수면에 와류를 만들어 그 반작용으로 앞으로 추진한다는 것을 밝혀냈다. Gao⁽²⁾ 등은 소금쟁이 다리에 나있는 수 마이크로미터 크기의 수많은 털이 소금쟁이를 수면에 뜰 수 있게 한다는 것을 밝혔고, 소금쟁이 다리 하나에 자기 체중의 15배의 힘을 가해도 수면에 뜰 수 있는 것을 실험을 통해 보였다. Suhr⁽³⁾ 등은 실제 소금쟁이 로봇을 만들어 정찰 로봇으로서의 가능성을 보였으며 실제 제작과정에서 터득한 설계기준(design rule)을 제시했다.

위에서 예로든 논문을 보면 알 수 있듯이 현재까지의 소금쟁이 관련 연구가 이론을 통한 정량적 연구 보다는 실험을 통한 정성적 연구에 집중되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 소금쟁이가 수면 위를 움직이거나 떠 있을 때 수면과 다리 사이에 작용하는 여러 가지 힘들을 정량적으로 해석하는데 어려움이 있기 때문일 것이다.

본 연구에서는 소금쟁이 다리를 실린더로 단순화시켜 소금쟁이 다리 하나가 수면에 뜰 수 있는 최대 무게(최대 비중)와 그 이상의 무게를 가진 다리가 수면 아래로 가라앉을 때, 시간에 따른 위치 변화를 해석적으로 풀고, 그 결과를 실험적으로 검증하였다. 이는 소금쟁이 움직임에 대한 이해를 돕고 논문 (3)과 같은 생체 모방 로봇을 만들 때 로봇 다리의 특성과 로봇의 최대 무게의 관계를 파악할 때나, 마이크로 잠수함이 수면 아래로 침강할 때의 특성을 이해하고자 할 때 사용될 수 있을 것이다.

2. 이론 해석

2.1 지배방정식

지배방정식을 만들기에 앞서 소금쟁이가 물 위를 걷거나 떠 있을 경우 소금쟁이 다리에 작용하는 힘이 어떠한 것들이 있는가에 대해 알아야 할 것이다. 크게 세 가지로 분류하면 첫째, 다리와 수면이 접촉하는 면에 작용하는 수압에 의한 힘 둘째, 다리와 수면, 공기가 만나는 곳에서 작용하는 표면장력, 마지막으로 중력에 의한 소금쟁

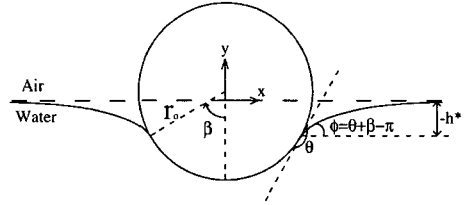


Fig. 1 Geometry of a cylinder lying horizontally at the air-water interface

이의 무게이다. 소금쟁이 다리 하나를 Fig. 1처럼 실린더로 단순화하고 길이 방향의 양 끝에 작용하는 표면장력의 영향을 무시할 때 위에 열거한 힘들을 순서대로 정리하면 다음과 같다.

$$F_{net} = F_p + 2\gamma\sin\phi - \pi\rho_s r_o^2 g \quad (1)$$

이때 F_p 는 실린더와 수면의 접촉면에 작용하는 압력을 적분함으로써 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_p = \int_{-\beta}^{\beta} (p - p_a) r_o \cos\psi d\psi \quad (2)$$

식 (1)의 좌변, F_{net} 가 0인 경우 즉, 소금쟁이가 수면에 떠 있는 경우 F_p 는 정적상태에서 다루기로 하고, F_{net} 가 0이 아닌 경우(본 논문에서는 가라앉는 경우로 한정한다.), F_p 는 동적상태에서 다루기로 한다.

2.1.1 정적(Static)상태

정적상태에서 수면 아래의 압력은 정수력학적 압력 분포를 띄므로 식 (2)에 $p - p_a$ 대신 $-\rho gh$ 를 대입함으로써 F_p 를 구할 수 있다.

$$F_p = \pi\rho r_o^2 g \left(-\frac{h^*}{r_o} \sin\beta + \beta - \sin\beta \cos\beta \right) \quad (3)$$

여기서 h^* 는 Fig. 1에 나와 있듯이 $x = r_o \sin\beta$ 에서 수면의 위치이고, 유체 계면에서의 압력 차이는 표면장력계수(γ)와 계면의 곡률의 곱과 같다는 Young-Laplace 방정식으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

$$h^* = -\sqrt{2\gamma(1 - \cos\phi)}/\rho g \quad (4)$$

식 (3)과 (4)를 식(1)에 대입한 후 실린더의 밀도와 물의 밀도로 구성된 무차원 변수, $D = \rho_s/\rho$ 와 실린더의 지름에 관한 무차원 변수, $B = \rho g r_o^2/\gamma$ 를 이용하여 무차원화된 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\pi BD = 2\sin\beta\sqrt{2B(1 - \cos\phi)} + B(\beta - \sin\beta\cos\beta) + 2\sin\phi \quad (5)$$

식 (5)의 좌변에 있는 항은 실린더의 무게를 나타내며 우변의 처음 두 개 항은 실린더에 작용하는 부력, 세 번째 항은 표면장력을 나타낸다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이 실린더가 수면에 뜰 수 있는 무게는 실린더의 지름, 접촉각(θ) 그리고 실린더의 중심축과 실린더와 수면의 접촉점이 이루는 각 β 로부터 결정되는 것을 알 수 있다. 이 때 D_{max} 는 실린더의 지름과 평형접촉각(θ_e)으로부터 B 와 θ 를 결정하고 β 를 $\pi - \theta$ 에서 π 까지 변화시켰을 때 주어진 β 구간 내에 있는 최대 D 값을 취함으로써 구할 수 있다.

2.1.2 동적(Dynamic)상태

동적 상태에서 F_p 는 실린더 주위 유동이 비압축성, 포텐셜 유동이라는 가정을 사용하여 유도하였다. 실린더가 가라앉을 때 실린더는 가속 되고 또한 그 주위의 유체도 가속된다. 따라서 베르누이 방정식은 다음과 같은 형태를 취한다.

$$\frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}|\nabla\Phi|^2 + gh = F(t) \quad (6)$$

가속되는 실린더 주위에 흐르는 유동의 속도 포텐셜⁽⁵⁾은

$$\Phi = \frac{h_o}{r} r_o^2 \cos\psi \quad (7)$$

이고 실린더 주위에 압력이 정수력학적 압력분포를 띤다고 가정할 때 식 (7)을 (6)에 대입함으로써 실린더 표면에서의 베르누이 상수 $F(t)$ 를 구할 수 있다.

$$F(t) = \frac{p_a}{\rho} + \ddot{h}_o r_o \cos\beta + 2h_o^2(\sin^2\beta - \frac{1}{4}) \quad (8)$$

위에서 구한 $F(t)$ 를 식 (6)에 대입하여 실린더 표면 주위에 압력분포를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{p(r_o, \psi)}{\rho} = \frac{p_a}{\rho} + \ddot{h}_o r_o (\cos\beta - \cos\psi) + 2h_o^2(\sin^2\beta - \sin^2\psi) - gh \quad (9)$$

위에서 얻은 압력 분포를 식 (2)에 대입하여 F_p 를 구하고 이것을 다시 식 (1)에 대입하면 지배방정식을 구할 수 있다. 이 때 길이, 시간, 압력에 관한 무차원 변수 $H_o = h_o/l_c, T = t/t_c, P = p t_c^2/\rho l_c^2$ 를 이용하여 지배방정식을 무차원화하면 다음과 같다.

$$\pi DB\ddot{H}_o = \overline{F_p} - \pi BD + 2\sin\phi \quad (10)$$

$$\overline{F_p} = -2H_o B^{1/2}\sin\beta + B(\beta + \cos\beta\sin\beta) + B(\cos\beta\sin\beta - \beta)\ddot{H}_o + \frac{8}{3}\dot{H}_o^2 B^{1/2}\sin^3\beta \quad (11)$$

식 (10)의 우변의 첫 번째 항은 실린더가 받는 압력에 의한 힘을 나타내고, 두 번째 항은 실린더의 무게, 세 번째 항은 표면장력을 나타낸다.

본 논문에서는 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하여 비선형 상미분 방정식인 식 (10)을 풀어 H_o 를 구했다. 이 때 식 (11)에 있는 \ddot{H}_o 항은 식 (10)의 좌변으로 이항하였고 식 (11)에 있는 시간에 관한 변수 β 는 식 (4)를 이용하여 H_o 에 관한 식으로 변환하여 풀었다. 또한 $\phi (= \theta + \beta - \pi)$ 에 있는 θ 는 동접촉각 중에 전진접촉각(θ_a)을 대입하였다.

다음 장에서는 정적상태와 동적상태에서 유도한 지배방정식의 타당성을 검증하기 위하여 지배방정식으로부터 유도된 예측치를 실험결과와 비교하였다.

3. 실험 및 결과

Table 1은 실험에 사용한 코팅재료, 코팅 방법 그리고 접촉각을 정리한 표이다. 정적상태 및 동

Table 1 Fabricated surfaces

material / method	θ_c (deg)	θ_a (deg)
lacquer / spray	72	111
candle paraffin / dip coating	93	-
paraffin wax / dip coating	104	-
AKD, Chloroform / spray	143	-

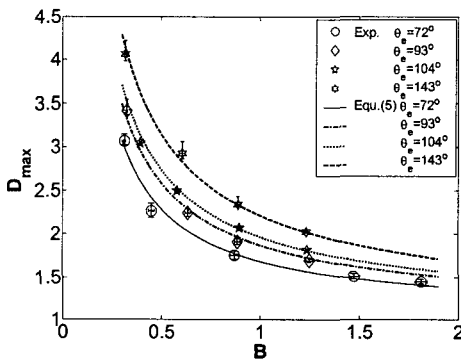


Fig. 2 Comparison between theoretical predictions and experimental results of floating cylinders

적상상태에서의 실험은 가로, 세로, 높이가 각각 600mm, 550mm, 130mm인 아크릴 수조에서 이루어 졌으며, 수면은 수조 바닥으로부터 70mm가 되게 하였다. 실험에 사용한 실린더는 Table 1에 제시된 재료와 방법으로 외경이 3~6mm(내경 1.7~4.9mm)인 pyrex 유리관을 코팅 한 후 유리관 안에 납 가닥(지름1.6mm) 또는 텅스텐 가닥(지름 1.5mm)을 집어넣어 만들었고, 실험 중 유리관 안으로 물이 들어가는 것을 방지하기 위해 유리관 양 끝에 유리관 내경과 같은 크기의 스티로폼 기둥을 채워 넣었다. 여기서 실린더의 길이는 이론식에서 가정했던 실린더 양 끝에서의 표면장력에 의한 영향을 무시하기 위해 실린더 반지름의 30 배 이상이 되게 했다.

정적상태에서의 실험은 핀셋을 이용하여 실린더를 수면 위에 띄우고 실린더가 수면에 뜰 때의 무게와 가라앉을 때의 무게를 찾아낸 후, 그 구간 내에서 실린더의 무게를 바꾸어 가면서 수면에 다시 띄워 주어진 실린더에 대하여 수면에 뜰 수 있는 최대 무게를 측정하였다. 여기서 실린더의 무게는 유리관 안에 있는 금속가닥의 길이를

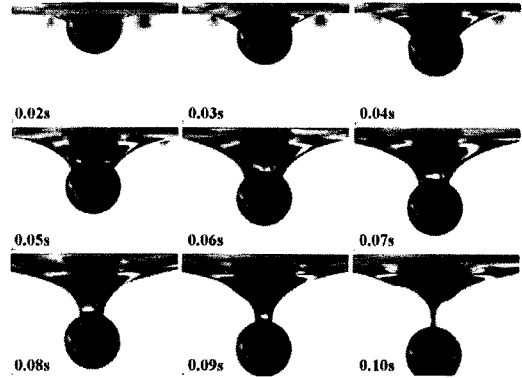


Fig. 3 Experimental images of a sinking cylinder ($B = 0.86, D = 1.92$)

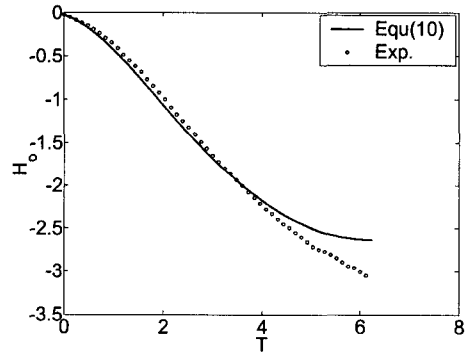


Fig. 4 Comparison between theoretical prediction and experimental result of a sinking cylinder ($B = 0.86, D = 1.92$)

조절함으로써 바꿀 수 있다. 정적상태에서의 실험 결과는 이론식으로부터 유도된 D_{max} 와 함께 Fig. 2에 나타내었고 두 결과가 잘 맞는 것을 확인할 수 있다.

동적상태에서는 래커(lacquer) 코팅된 지름 5.09mm($B=0.86$), 질량 3.17g($D=1.92$)인 실린더를 사용했다. 이때 사용한 실린더의 비중은 식 (5)로부터 구한 D_{max} 크다. 실린더는 초기에 수면과 접촉된 상태이며, 실린더를 잡고 있던 핀셋을 살짝 벌려 실린더를 수면 아래로 낙하시켰다. 낙하 후 실린더는 고속카메라(Redlake HS-4)로 촬영하였으며 사진 분석소프트웨어(MicrosoftPhotoeditor)를 이용하여 시간에 따른 실린더의 위치를 알 수 있었다. Fig. 3은 고속카메라로 촬영된 사진이며 Fig. 4는 Fig. 3에 있는 실린더가 낙하 후 수면에서 분리될 때까지 시간에 따른 실린더 중심의 위

치와 식 (10)으로부터의 이론 예측치를 나타낸 것이다. 이때 이론식으로부터의 예측치는 식 (10)에 실험을 통해 얻은 실린더의 초기 위치와 초기 속도(Fig. 4에 있는 처음 두 점의 기울기)를 초기 조건으로 하여 얻은 것이며, 식 (10)에 $\sin\phi$ 항에 있는 $\theta(=\theta_a)$ 에는 실린더가 낙하 후 수면에서 분리될 때까지 실린더와 수면의 접촉점에 생기는 접촉각의 평균, $\theta_a = 111^\circ$ 를 대입하였다.

Fig. 3에서는 실린더가 낙하 후 0.102초 만에 수면과 완전히 분리되어 수면으로부터 약 8.32mm 아래로 낙하한 것을 알 수 있다. 이때 실린더의 평균속력(=82mm/s)은 실린더가 수면과 분리된 후 실린더의 무게와 항력이 평형을 이룰 때의 속력, 즉 종말속도(=355mm/s)보다 약 4.3배 느린 것으로, 실린더가 수면에 붙어 낙하 할 때 표면장력이 실린더의 낙하 속도를 늦추는 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서는 T=4 이 후 실험 결과가 이론 결과와 큰 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 그 이유는 이론에서는 실린더가 낙하를 시작하여 수면에서 분리될 때까지 수면과 실린더의 접촉부의 길이가 실린더 길이의 두 배로 항상 일정한 반면 실제 실험에서는 어느 순간 이후부터 그 길이가 점점 줄어들어 그 순간 이 후부터는 표면장력의 수직방향 성분의 힘이 이론 예측치 보다 낮아지기 때문이다. 실험에서 수면과 실린더의 접촉부의 길이가 감소한다는 것은 실린더를 낙하 시킨 후 실린더를 Fig. 3처럼 측면이 아닌 정면에서 바라보았을 때 수면이 실린더 양 끝점에서 분리되기 시작하여 점점 실린더 중심으로 모이는 것으로부터 알 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 소금쟁이 다리를 실린더로 단순

화하여 실린더의 지름과 접촉각이 주어졌을 때 수면 위에 뜰 수 있는 실린더의 최대무게(비중)를 해석적으로 유도하였고, 이 유도한 식에서 예측한 무게 이상의 실린더가 수면 아래로 낙하할 때 시간에 따른 위치를 해석적으로 예측할 수 있었다. 또한 위에서 얻은 두 이론식의 타당성을 검증하기 위해 실험결과와 이론을 통한 예측치를 비교하였고, 그 결과 두 경우 서로 잘 일치하는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문에서 사용된 초기 지배방정식을 세우는 데 도움을 준 Dominic Vella에게 감사의 뜻을 전합니다. 본 연구는 정밀기계설계공동연구소에 의하여 집행된 한국학술진흥재단(KRF-2005-003-D00033)지원으로 이루어졌습니다.

참고문헌

- (1) Hu, D. L., Chan, B. and Bush, J. W. M., 2003, "The Hydrodynamics of Water Strider Locomotion," *Nature*, Vol. 423, pp. 663~666.
- (2) Gao, X. and Jiang, L., 2004, "Water-repellent Legs of Water Striders," *Nature*, Vol. 432, p. 36.
- (3) Suhr, S. H., Song, Y. S., Lee, S. J. and Sitti, M., 2005, "Biologically Inspired Miniature Water Strider Robot," *Proc. Robotics : Science and Systems I*. Boston, USA.
- (4) Batchelor, G. K., 2002, *An Introduction To Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, pp. 66~67.
- (5) Paterson, A. R., 1983, *A First Course in Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, pp. 236~239.