

연잎성계의 군집 형태에 따른 포식 효율의 수치적 연구

Numerical Study on Feeding Efficiency in Sand Dollar Aggregation

오광석^{1*}, 김종암¹

서울대학교 기계항공공학부¹

초 록

연잎성계가 물체의 방향을 유입류에 평행하게 맞추어 포식하는 이유에 대해서는 크게 유체역학적인 설명과 생태학적인 설명이 양립하고 있다. O'Neill과 Nakamura와 같은 연구자들에 의해 연잎성계의 이러한 행태를 유체역학의 관점에서 설명할 수 있지만, 정작 셋 이상의 연잎성계 군집의 포식 효율에 대해서는 개체 수에 기반을 둔 생태학적 관점에 의존하고 있다. 따라서 본 연구에서는 연잎성계 군집 내에서의 개체들의 배열을 모델링하고, 다양한 군집 배열에서 개체들의 포식 효율을 EDISON_전산유체 시스템을 활용해 분석하였다. 특히 포식 효율을 결정하는 과정에서 얇은 익형 이론을 이용함으로써 포식 효율을 결정하는 유체역학적 특성이 양력계수임을 확인하였다.

Key Words : 연잎성계(Sand dollar), 포식 효율(Feeding Efficiency), 전산유체역학(Computational fluid dynamics), 얇은 익형 이론(thin airfoil theory), 양력계수(Lift coefficient)

1. 서론

연잎성계(Sand dollar)는 성계강 연잎성계목을 이루는 해양무척추동물을 말하며, 주로 연안 해저에 서식하는 원반 모양의 생물체이다. 연잎성계는 Fig. 1과 같이 물체의 일부분을 해저에 묻은 상태로 몸을 물살에 평행하게 맞추어 포식 활동을 하는 것으로 알려져 있다. 연잎성계의 이러한 행동을 하는 이유에 대해서는 크게 유체역학적인 설명⁽¹⁻³⁾과 생태학적인 설명^(4,5)이 양립하고 있다. O'Neill⁽¹⁾은 연잎성계에 작용하는 양력에 의해 연잎성계 주위의 유선이 연잎성계의 입(Fig. 1에서의 M에 해당한다) 쪽으로 휘어지기 때문에 포식 효율이 높아진다고 설명하였다. 이를 뒷받침하기 위해 두 연잎성계 사이의 수직 간격이 특정한 값을 갖게 되면 위쪽 연잎성계의 포식 효율이 최대가 됨을 실험적으로 보였다. 여기에 Nakamura⁽²⁾는 연잎성계가 받는 항력의 크기가 물살에 평행할 때 최소가 되기 때문이라고 설명하였다. 그러나 셋 이상의 연잎성계 군집에 대해서는 개체 수에 기반을 둔 생태학적 설명^(4,5)이 주를 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 연잎성계 군집 내에서의 개체들의 배열에 따른 포식 효율을 수치적으로 연구하였으며, 특히 포식 효율을 결정하는 과정에서 유체역학 및 항공역학 교과목의 핵심 이론인 얇은 익형 이론을 고려하여 익형과 비슷한 형상을 가진 연잎성계의 유체역학적 특성을 고려하였다.

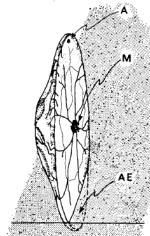


Fig. 1. 연잎성계⁽⁶⁾(A: 항문, M: 입, AE: 항문의 반대편(Anterior Edge))

2. 해석 방법

2.1 연잎성게 주위의 유동 해석 조건

2차원 연잎성게 형상을 선정하고 이를 선행연구에서 측정한 실험값과 비교하여 검증하였다. 유동의 레이놀즈수를 계산하기 위한 특성길이는 연잎성게의 지름으로 설정하였으며, 연잎성게의 평균 지름은 약 0.065m라고 알려져 있다.⁽¹⁾ 실험에서 사용된 유동 조건은 Table 1와 같다.

Table 1. 연잎성게 주위의 유동조건⁽¹⁾

유체	온도(°C)	밀도(kg/m ³)	점성계수(mPas)	유속(m/s)	레이놀즈수(Re)	반음각(°)
물	14	999	1.308	0.1-2.0	5,000~100,000	0

실제 연잎성게의 표면은 작은 돌기로 인해 매끄러운 형상이 아니므로, 레이놀즈수 10,000 이상의 유동 흐름에서는 유동장이 난류로 천이하는 특성을 갖고 있다.⁽¹⁾ 따라서 본 연구에서는 전체 유동장을 난류로 가정하였으며, 다중블록의 비압축성 난류 유동 해석을 위해 2D_Incomp-2.1_P 해석자를 활용하였다. 유동의 시간특성은 연잎성게의 형상이 유선형 물체에 가까워 경계층분리가 일어나지 않는다고 가정하고 정상유동으로 설정하였으며, 유동의 수렴조건은 1×10^{-5} 로 하였다.

2.2 유동 해석을 위한 격자 제작

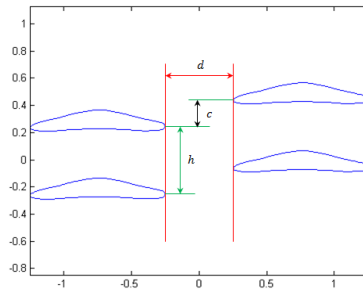
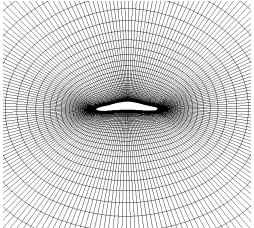
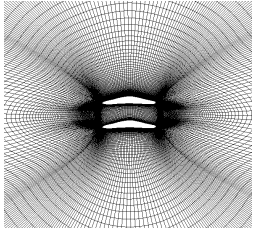
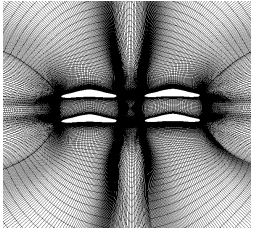


Fig. 2. 연잎성게의 군집 형태를 나타내는 매개변수

본 연구에서의 연잎성게 군집은 선행연구에서 제시한 두 개와 이를 확장한 네 개(Fig. 2)로 한정한다. 연잎성게 군집을 모델링하는 매개변수들을 Fig. 2에 나타내었다. h는 유동 흐름에 수직한 방향으로 배열된 두 연잎성게 사이의 최단거리를 의미한다. 또한 d는 유동흐름에 평행한 방향으로 배열된 두 연잎성게의 앞전과 끝전 사이의 유동흐름방향 거리를 의미하며, c는 앞전과 끝전 사이의 수직방향 거리를 의미한다. h와 c는 선행연구⁽¹⁾와의 유기성을 위해 0.05m 단위로 조절하였고, d는 연잎성게의 반지름을 단위로 하여 조절하였다.

Table 2. 격자의 형상과 크기

격자 형상			
블록 개수	1	5	8
격자 개수	16,000	38,276~73,920	84,608

연잎성게 형상 주변에서의 격자의 형상과 블록의 개수, 총 격자 개수는 Table 2와 같다. 격자는 O-type으로 설계하였으며, 원방의 크기는 연잎성게의 지름의 20배로 설정하였다. 특히 경계층 해석이 원활하게 이루어질 수 있도록 $y^+=1$ 일 때의 격자 간격을 고려하였으며, 벽면에서의 격자의 직교성을 위해 eMEGA에서 제공하는 타원형 알고리즘을 적용하였다.

2.3 얇은 익형 이론⁽⁷⁻⁸⁾을 이용한 포식 효율의 해석 기준

연잎성게의 몸체는 유선형에 가깝기 때문에 얇은 익형 이론을 따른다. 얇은 익형 이론에서는 받음각이 0도일 때 익형의 캠버가 커질수록 양력계수가 증가하며, O'Neill의 설명⁽¹⁾과 같이 연잎성게의 벽면 주위의 유선이 더욱 벽면에 가깝게 휘어진다. 통계⁽¹⁾에 따르면 유속이 느린 곳에 서식하는 연잎성게 중은 몸체의 캠버가 큰 반면, 유속이 빠른 곳에 서식하는 종은 몸체의 캠버가 작은 형상을 띠고 있다. 양력은 양력계수와 유속의 제곱에 비례하므로, 유속이 빠르다면 양력계수가 작아도 일정 크기의 양력을 발생시킬 수 있지만 유속이 느리다면 양력계수가 커져야 빠른 유속에서와 비슷한 수준의 양력을 발생시킬 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 유속이 느린 곳에 서식하는 연잎성게는 양력계수를 키우기 위해 캠버가 큰 형태로 진화했음을 유추할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 점을 착안하여 연잎성게의 생존과 연관된 포식 효율을 결정하는 유체역학적인 파라미터로 연잎성게 몸체의 양력계수를 선택하였다.

3. 해석 결과

3.1 2차원 연잎성게 형상의 검증

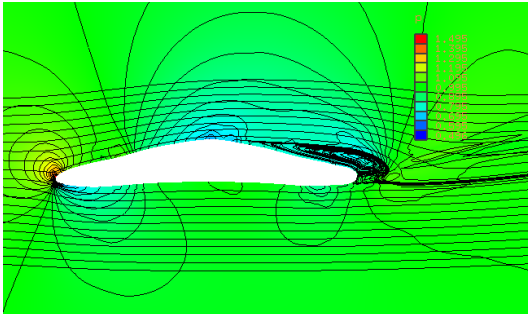


Fig. 3. 연잎성게 주위의 압력장과 유선

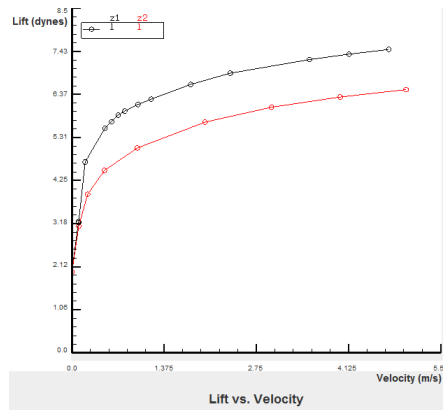


Fig. 4. 실험과 유동해석의 양력-속도 그래프
(양력은 로그값 / 검정 : 수치해석, 빨강 : 실험)

Fig. 3은 2차원 연잎성게 형상을 해석한 결과이다. 유선의 흐름을 보면 연잎성게 윗부분에 와류가 존재하지만, 경계층이 분리되어 떨어져 나가는 모양이 아니라 벽면에 부착된 형태로 존재한다. 따라서 유동을 교란시키는 비정상 특성은 거의 없다고 판단하여, 정상유동을 가정하여 해석하였다.

Fig. 4는 유동 해석을 통해 얻은 양력의 크기를 선행연구⁽¹⁾와 비교한 결과이다. 수치해석 결과와 실험값의 경향성이 전체적으로 비슷하며, 수치해석 값이 실험값에 비해 평균적으로 10배 정도 큰 것을 알 수 있다. 이는 2차원 유동과 3차원 유동의 차이로 볼 수 있는데, 2차원 유동에서는 양력을 계산할 때 $L = c_{Lq}S = c_{Lq}(b \cdot 1)$ 로 계산하지만, 3차원 유동에서는 형상의 가로세로비(aspect ratio)를 고려하여

$L = c_{Lq}S = c_{Lq}b \frac{b}{AR}$ 로 계산한다. 선행연구에서 측정된 연잎성게의 가로세로비는 약 0.949 이므로 2차

제 2회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 경진대회

원 유동과 3차원 유동의 양력의 비는 $\frac{L_{2D}}{L_{3D}} = \frac{AR}{c} = \frac{0.949}{0.065} = 14.6 = O(10^1)$ 가 되어 평균적으로 10배 정도 차이가 난다. 따라서 본 연구의 해석 결과와 선행 연구의 실험 결과가 서로 유사한 것을 확인할 수 있다.

3.2 두 연잎성계의 수직간격 h에 따른 포식 효율의 비교

Table 3. 두 연잎성계 사이의 수직간격 h에 따른 위쪽 연잎성계의 양력계수

양력계수		두 연잎성계 사이의 수직간격 h($\times 10^{-2}$ m)									
		0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	
유속 (m/s)	0.25	0.2560	0.6214	0.2167							
	0.5	0.2629	0.5973	0.2545	0.2008						
	0.75		0.5577	0.5800	0.5683	0.3305					
	1				0.3819	0.4464	0.4398	0.4068			
	1.25						0.2788	0.3995	0.3481		
	1.5							0.3248	0.3534	0.3295	

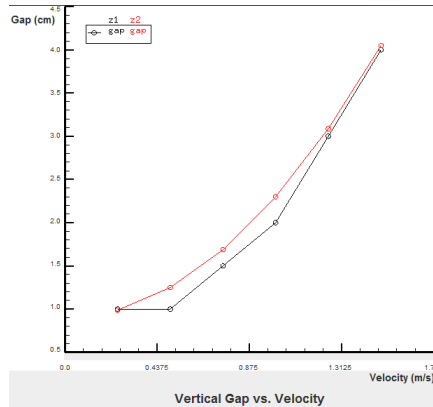


Fig. 5. 유동 속도와 최적포식간격 사이의 관계
(검정 : 유동해석, 빨간 : 실험)

유속과 두 연잎성계 사이의 수직간격 h를 변화하면서 총 21개의 유동 케이스를 해석하였다. 연잎성계의 입은 2차원 형상의 아랫면 중앙에 위치하므로, 두 연잎성계 중에서 위쪽 연잎성계의 입 주위의 유동이 아래쪽 연잎성계의 뒷면에 의해 영향을 받는다. 반면 아래쪽 연잎성계의 입 주위에는 영향을 주는 요인이 존재하지 않기 때문에, 유속 및 수직간격 h와 함께 비교해야 할 값은 위쪽 연잎성계의 양력계수이다. 21개의 케이스에 대하여 위쪽 연잎성계의 양력계수를 계산한 결과는 Table 3과 같다. 각 유속에 대해 최대의 양력계수 값을 굵은 글씨로 표시하였다. 유속이 일정할 때 두 연잎성계 사이의 간격이 멀어지면 양력계수가 최대값이 될 때 까지 증가하다가 다시 감소하는 것을 알 수 있다. 따라서 양력계수가 최대값을 갖는 두 연잎성계 사이의 수직간격을 그 유속에서의 최적포식간격이라고 볼 수 있으며, 이 때 포식 효율도 최대가 될 것이라 예상할 수 있다.

유속에 따른 최적포식간격을 그래프로 나타내면 Fig. 5와 같다. 유동해석으로 얻은 값과 대조하는 실험값은 선행연구⁽¹⁾를 참고하였다. 선행연구에 따르면 최적포식간격은 통계적으로 유동 속도의 제곱에 비례한다. 유동해석으로 얻은 최적포식간격도 이러한 경향성을 잘 따르고 있으며, 특히 유속이 빨라질수록 실험값에 가까워짐을 알 수 있다.

3.3 연잎성계 군집에서의 군집 형태에 따른 포식 효율 비교

연잎성계의 군집형태를 나타내는 유동흐름방향 거리 d 와 수직방향 거리 c 를 변화하면서 유동을 해석했다. 본 논문에서는 유속이 1.0m/s, d 가 연잎성계의 반지름인 0.032m, h 가 Table 3에서 찾은 최적포식 간격인 0.02m로 정하였을 때 c 값만을 0.01m 단위로 변화한 결과를 다룰 것이며, 향후 d 를 변화하였을 때의 계산을 추가적으로 수행할 예정이다. 네 개의 군집에서도 포식 효율을 논의할 기준 연잎성계는 두 개일 때와 마찬가지로 “왼쪽 위”에 있는 연잎성계이다. 오른쪽 위에 있는 연잎성계에게 들어오는 유입류는 이미 앞쪽에 있는 연잎성계들을 통과하면서 유속과 받음각 등의 유동조건이 많이 변화한 상태이므로 포식효율을 비교할 대상으로는 적절하지 못하다. c 의 값이 -0.01m, 0m, 0.01m일 때 왼쪽 위 연잎성계의 양력계수를 연잎성계가 두 개일 때와 비교하여 Table 4에 정리하였다.

Table 4. 연잎성계의 군집 형태에 따른 양력계수의 변화

양력계수	4 개			2 개
	$c = -0.01m$	$c = 0m$	$c = +0.01m$	
	0.452187	0.758543	0.445848	0.44642

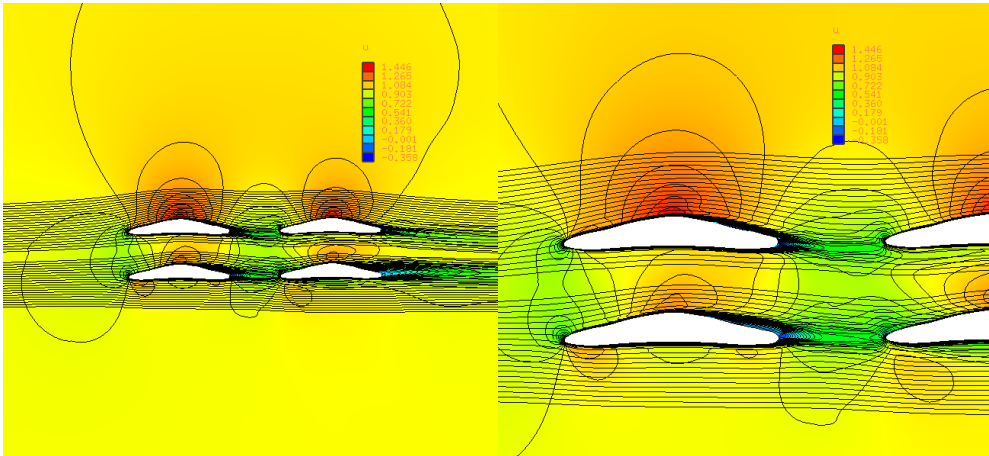


Fig. 6. (좌) $c = 0cm$ 일 때의 x방향 속도장과 유선, (우) 확대한 연잎성계 근처의 유동

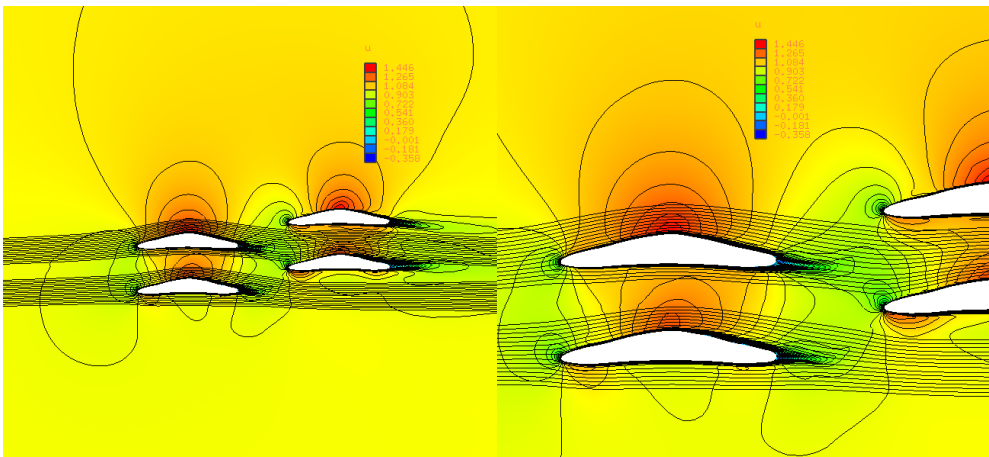


Fig. 7. (좌) $c = 1cm$ 일 때의 x방향 속도장과 유선, (우) 확대한 연잎성계 근처의 유동

Table 4에 따르면, c 가 0m일 때를 제외하고는 네 개일 때와 두 개일 때의 양력계수에는 큰 차이가 없다. Fig. 6과 Fig. 7은 c 가 0m일 때와 0.01m일 때의 네 개의 연잎성계 주변의 x방향 속도장을 확대하

제 2회 첨단 사이언스·교육 허브 개발(EDISON) 경진대회

여 표시한 것이다. 두 그림을 비교하면 Fig. 6에서는 앞쪽 연잎성계 주위를 지나는 유선이 뒤쪽 연잎성계 주위로 흘러들어간다. 반면 Fig. 7에서는 앞쪽 연잎성계 주위를 지나는 유선이 뒤쪽 연잎성계와 만나지 않고 바로 후류로 흘러나간다. 따라서 c 가 0m 일 때가 다른 조건보다 유동의 흐름에 많은 제약이 있으며, 특히 연잎성계 사이에 흐르는 속도의 값이 다른 조건일 때보다 낮아져 결과적으로 높은 압력과 높은 양력계수를 갖게 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 연잎성계 군집 내에서의 개체들의 배열을 모델링하고, 다양한 군집 배열에서의 개체들의 포식 효율을 설명하는 데에 초점을 맞추었다. 얇은 익형 이론을 적용하여 연잎성계의 포식 효율을 결정하는 요인으로 양력계수를 제시하였으며, 이로부터 두 개의 연잎성계의 수직간격에 따른 양력계수의 변화를 계산하였고, 그로부터 최적포식간격의 존재를 확인하였다. 또한 최적포식간격과 유속과의 관계도 선행연구에 부합하는 수준이었으며, 양력계수를 이용하여 포식 효율을 유추할 수 있음을 보였다. 또한 4개의 연잎성계 군집에 대해 뒤쪽 연잎성계들의 수직방향 위치에 따라 왼쪽 위 연잎성계의 양력계수가 어떻게 변화하는 가에 대하여 계산하였으며, 이로부터 연잎성계들이 동일 선상에 위치할 때 급격하게 양력계수가 높아지는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 EDISON 중앙센터와 전산열유체 전문센터의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) O'Neill, P.L., 1978, "Hydrodynamic analysis of feeding in sand dollars", *Oecologia*, Vol. 34, Issue 2, pp. 157-174.
- (2) Nakamura, R., 1994, "Lift and drag on inclined sand dollars", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 178, Issue 2, pp. 275-285.
- (3) Francisco, V., and Herzka, S.Z., "Regulation of feeding mode by the sand dollar *Dendraster excentricus* in a shallow estuarine habitat", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 383, Issue 2, pp. 146-155.
- (4) Timko, P.L., 1975, "High density aggregation in *Dendraster excentricus* (Eschscholtz)", Ph.D. Thesis, University of California, San Diego, La Jolla.
- (5) Fodrie, J.F., Herzka, S.Z., Lucas, A.J., and Francisco, V., 2007, "Intraspecific density regulates positioning and feeding of the sand dollar *Dendraster excentricus*", *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, Vol. 340, Issue 2, pp. 169-183.
- (6) Timko, P.L., 1976, "Sand dollars as suspension feeders: a new description of feeding in *Dendraster excentricus*", *The Biological Bulletin*, Vol. 151, No. 1, pp. 247-259.
- (7) White, F. M., 2007, *Fluid Mechanics*, McGraw-Hill, New York, pp. 492-500.
- (8) Anderson, J. D. Jr., 2007, *Fundamentals of Aerodynamics*, McGraw-Hill, New York, pp.319-338.