

나비 펌프의 구조와 동적 거동의 in vivo 가시화

이승철* · 김보흠** · 이상준†

In vivo visualization of liquid-feeding phenomena of a butterfly

Seung-Chul Lee*, Bo-Heum Kim** and Sang-Joon Lee†

Abstract. Butterflies have been known to suck viscous liquids through a long, cylindrical proboscis using the large pressure difference formulated by the cyclic expansion and contraction of a muscular pump located inside their head. However, there are few studies on the liquid-feeding phenomena in a live butterfly, because it is hard to observe the internal morphological structures under in vivo condition. In this study, the dynamic motion of the pump system in a butterfly was in vivo visualized using synchrotron X-ray micro-imaging technique to analyze the liquid-feeding mechanism. The period of the liquid-feeding process is about 0.3sec. The expansion stage is about two times larger than the contraction stage in one cycle. The cyclic variation of pump volume generate large negative suction pressure and the pressure difference inside the long proboscis of a butterfly is estimated to be larger than 1atm.

Key Words: Butterfly (나비), Muscular pump (근육 펌프), X-ray imaging (X선 영상)

1. 서 론

나비는 액체 섭취를 통해 영양분을 공급 받으며, 이를 위해 잘 발달된 하나의 근육 펌프와 가늘고 긴 침(proboscis)을 가지고 있다. 나비는 근육 펌프의 팽창과 수축을 통해 형성된 큰 압력구배를 이용하여 침을 통해 액체를 흡입한다⁽¹⁾. 나비의 침은 평상시에는 코일 형태로 말려있으나, 액체를 탐지하면 길게 펴진다⁽²⁾. 이와 같은 특이한 침의 구조를 이용하여 꽃과 과일로부터 액체를 손쉽게 빨아먹을 수 있다.

기존의 연구들은 대부분 생리학적 관점에서 나비의 액체 섭취를 연구해왔다. 예를 들어, 나비와 액체사이의 상관관계를 밝히기 위해 과즙의 점도를 변화시키면서 단위 시간당 과즙 섭취 질량을 시뮬레이션을 통해 계산하거나⁽³⁾ 실험적으로 측정하였다⁽⁴⁾. Monaenkova 등은⁽⁵⁾ 나비 침의 내벽이 미세 크기의 스펀지 형태로 구성되어있으며 나비가 모세관 현상을 이용하여 액체를 침

내부의 도관으로 끌어들이는 현상을 방사광 가속기를 이용하여 관찰하였다.

나비가 액체를 섭취하는 메커니즘을 밝히기 위해서는 나비가 액체를 섭취하는 과정 동안 펌프근육이 어떻게 작동하는지를 알아야 한다. 하지만 아직까지 나비 머리 속에 위치한 펌프 시스템의 동적 거동에 대한 체계적인 연구가 거의 이루어지지 않았다.

나비 펌프의 동적 거동을 관찰하기 위해서는 실제 살아있는 나비가 섭취하는 액체의 체내 이동과 펌프를 구성하는 근육 조직들의 움직임을 실시간으로 관찰하는 in vivo 실험이 필수적이다. 본 연구에서는 포항 방사광 가속기(PAL)의 X선 영상기법을 이용하여 나비 펌프의 내부 구조와 동적거동을 실시간으로 가시화하였다.

2. 실험방법 및 모델링

2.1 나비 펌프의 3차원 구조 가시화

본 연구에서는 성충으로 우화한 지 2~3일이 지난 나비(*Pieris Rapae*)를 실험 샘플로 사용하였다. 나비 펌프의 3차원 구조를 알아보기 위하여 포항가속기 연구소 7B2 빔라인의 X선 단층촬영(CT) 시스템을 이용하

†포항공과대학교 기계공학과
E-mail : sjlee@postech.ac.kr

*포항공과대학교 기계공학과

**포항공과대학교 생체유체연구단

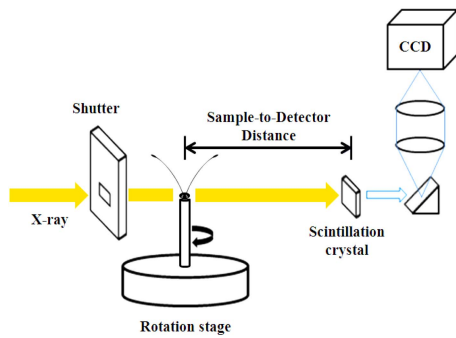


Fig. 1. Schematic diagram of synchrotron X-ray micro CT.

였다. Fig. 1은 본 연구에 사용되어진 X선 단층촬영 시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 미세가위로 나비의 목 부위를 절단하여 분리된 머리를 순간 접착제를 이용하여 스테이지 위에 부착한 후 바로 액체 질소에 담가 머리부위를 고정(fixation)시켰다. 그리고 샘플이 부착된 스테이지를 0도에서 180도까지 0.5도씩 회전시키며 361장의 X선 영상을 획득하였다. 이렇게 취득한 X선 영상에 OCTOPUS 소프트웨어를 적용하여 단층 영상으로 변환하였다⁽⁶⁾. 이렇게 구한 단층 영상들에 AMIRA 소프트웨어를 이용하여 3차원 영상으로 재구성 하고⁽⁷⁾ 대표적인 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 나비 펌프의 동적거동 모델링

기존의 수치해석 연구에서는 나비 펌프를 원통(cylinder)형으로 가정하였다⁽³⁾. Fig. 2는 측면, 정면, 윗면에서 바라본 나비 펌프의 3차원 재구성 영상이다. Fig. 2(b)의 정면 영상에서 나타난 펌프는 타원 형상을 보여주고 있으며, Fig. 2(c)의 윗면 영상에서 펌프는 장단축의 길이(a, b)가 거의 같은 원에 가까운 형상을 가지는 것으로 나타났다.

기존의 해부학적 연구들에 따르면 펌프의 하부는 단단히 경화되어 있는 반면에, 상부는 신축성이 우수하고, 확장근과 수축근에 연결되어 있어 주로 이 부분이 확장과 수축을 반복한다⁽²⁾. 이러한 동적거동의 특성은 Fig. 5(b)에 잘 나타나 있다.

이에 따라 나비 펌프를 Fig. 3와 같이 장단축 a, b의 길이는 같고, 높이 c의 변화로 체적 변화가 일어나는 타원체 형상으로 가정하였다.

나비 펌프에 걸리는 압력구배를 계산하기 위해 다

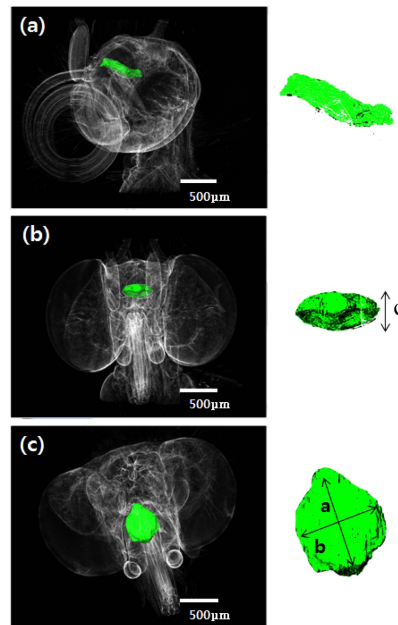


Fig. 2. X-ray micro CT images of a butterfly head (a) lateral view (b) frontal view (c) top view.

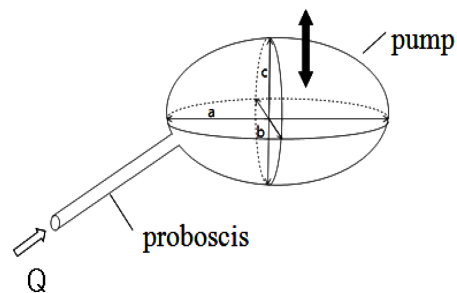


Fig. 3. Ellipsoidal model for the pump volume of a butterfly.

음과 같은 가정들을 사용하였다⁽³⁾.

- (1) 나비의 침은 내부 직경이 일정한 긴 튜브이다.
- (2) 나비의 액체 섭취과정에서 모세관 현상이 미치는 영향은 무시할 수 있다. 본 실험에서 나비가 조영제를 섭취하기 시작하는 초기 단계 이외에는 나비 침 내부에 계면이 나타나지 않았다.
- (3) 침 내부를 흐르는 유체는 층류(laminar flow)이다. 본 연구에서 다룬 액체 섭취과정의 레이놀즈 수는 약 0.024 이었다.
- (4) 본 연구에서 계산된 Womersely number(Wo)는 약 0.01이므로, 침 내부에서의 unsteady 흐름의 영향을

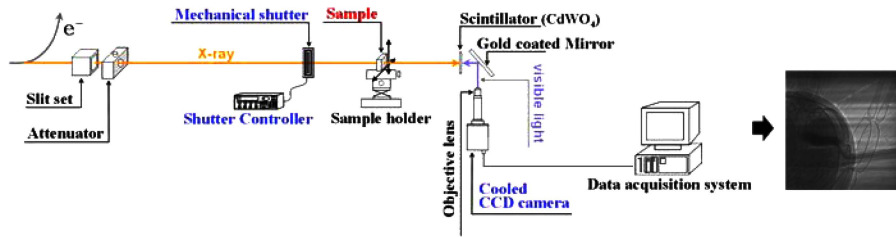


Fig. 4. Experimental set up for synchrotron X-ray imaging of a liquid-feeding butterfly.

무시할 수 있고, 유동을 Hagen-Poiseuille 흐름으로 가정할 수 있다.

(5) 나비에게 공급된 요오드 용액은 non-Newtonian 유체이며 유량에 대한 Hagen-Poiseuille 식은 다음과 같다.

$$Q(L) = \frac{\pi R^3}{1/n+3} \left(\frac{\Delta P(t)R}{2mL} \right)^{1/n} \quad (1)$$

여기서 R과 L은 칩의 반지름과 길이를 나타낸다. 본 연구에 사용된 요오드 용액에 대해 측정된 m, n 값은 각각 0.002651, 1.4690이었다.

2.3 나비 펌프의 동적 거동 가시화

불투명한 나비 머리 내부에 위치한 펌프 조직(organ)의 움직임을 가시화하기 위해서 포항가속기 연구소의 1B2 빔라인의 X선 미세영상시스템을 이용하였다. Fig. 4은 본 연구에 사용되어진 가속기 X선 미세영상시스템의 개략도를 나타낸 것이다. 가속기 저장링(storage ring)에서 나오는 X선을 측정하고자 하는 샘플에 조사시키면, 샘플의 내부 조직들의 경계면에서 위상차(phase difference)가 발생하게 된다. 이러한 위상차 정보가 포함된 X선 영상은 10^{-10} m 스케일의 파장을 가지고 있어서 우리 눈에는 보이지 않는다. 신틸레이터(scintillator, CdWO₄)는 눈에 보이지 않는 이러한 X선 영상을 가시영역의 빛으로 바꾸어 주는 결정체(crystal)로 여기를 통과한 X선 영상은 금으로 코팅된 거울(gold coated mirror)을 통해 반사되고, 이를 대물렌즈가 장착된 고속 카메라를 이용하여 X선 영상을 연속적으로 취득하게 된다⁽⁹⁾.

나비의 칩, 더듬이, 두개골 등과 같이 구조가 단순한 조직은 위상차에 의해 그 경계(boundary)를 잘 구분할 수 있다. 하지만 복잡한 구조의 근육과 골격으로 둘러

싸인 펌프 조직의 경우, 위상차 대비만으로는 그 경계를 뚜렷하게 구분하기 어렵다. 그리고 나비가 주로 섭취하는 액체의 경우 연조직(soft tissue)과 밀도 차이가 크지 않아 조영제 사용이 필요하다⁽¹¹⁾. 본 실험에서는 나비를 움직이지 못하도록 접착테이프를 스테이지에 고정하였다. 그리고 나비 칩의 형상을 평상시 과즙을 섭취할 때와 유사하게 만들기 위해 미세 바늘로 말려 있는 칩을 펴고 그 끝에 요오드 용액이 닿게 하였다. 요오드 용액(600 mg/ml)의 점도는 나비가 가장 선호하는 과즙의 점도 범위(sucrose wt. 30%~40%)에 들도록 하였고, 내경 1 mm의 실리콘 튜브를 이용하여 나비 칩 끝에 용액을 공급하였다.

1.74 μ m/pixel의 공간 해상도를 갖는 CCD카메라를 이용하여 나비가 조영제를 섭취하는 동안 펌프의 체적 변화를 초당 24장씩 취득하였다. Fig. 5(a)는 한주기 동안의 나비 펌프의 동적 거동을 보여주고 있다. 조영제가 채워지는 펌프 부위에서 빛의 강도는 다른 부위에 비해 훨씬 작은 값을 가진다. 이에 따라 빛 강도의 문턱치(threshold) 값을 설정하고 이를 기준으로 펌프 경계를 구분하여 Fig. 5(b)에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 나비 펌프의 동적 거동

Fig. 5에서 설명한 것처럼 나비 펌프의 하부는 고정되어 있고 상부부위의 수축과 팽창에 기인하여 체적변화가 일어난다. 초기위상 1/8P에서 6/8P 위상까지는 근육 펌프의 팽창으로 인해 액체가 흡입되는 단계(intake stage)이다. 이 단계에서 Fig. 5 (b)의 경계 영상을 살펴보면 칩과 연결된 부분인 펌프 입구 쪽 경계가 돌출되어 있음을 알 수 있다. 이것은 칩을 통해 조영제가 펌프 내부로 들어오고 있음을 의미한다. 조영제 용액은

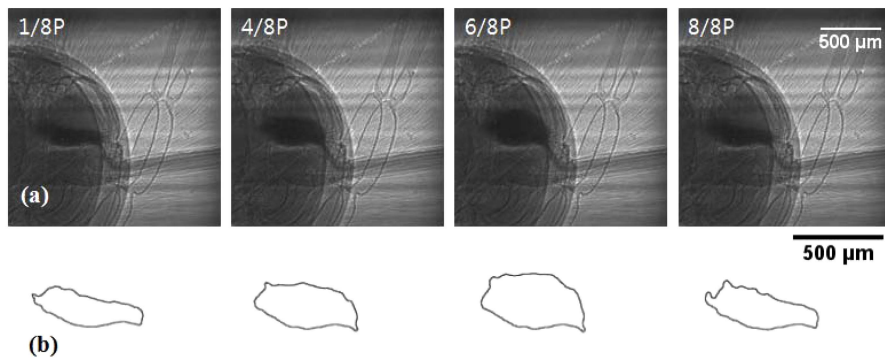


Fig. 5. X-ray images showing the systaltic motion of a butterfly's pump organ and variation of its boundary.

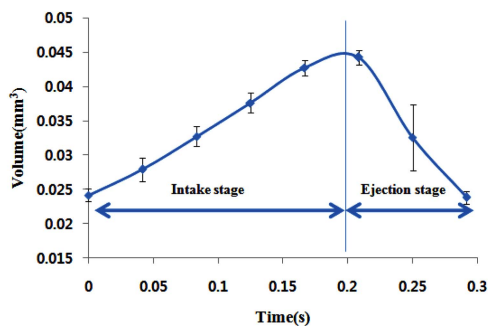


Fig. 6. Volume variation of pump organ of a butterfly.

침을 통해 나비 머리 내부로 들어와 펌프 공간을 채우게 된다. 6/8P 위상에서 8/8P 위상 사이는 펌프의 수축으로 인해 액체가 방출되는 단계(ejection stage)이다. 펌프가 수축하게 되면 액체가 펌프 후방에 위치한 식도로 방출되어진다.

3.2 나비 펌프의 체적 변화

나비의 근육 펌프는 Fig. 3에서 설명한 것처럼 타원체 모델로 가정할 수 있으며, 이 타원체의 3축 길이 a, b, c는 Fig. 5(b)의 경계를 나타낸 영상으로부터 구할 수 있다. 길이 a와 c는 영상에서 바로 측정할 수 있으며, b의 경우 길이 a값과 동일하다고 가정하였다. 따라서 경계면을 나타낸 영상(Fig. 5b)으로부터 펌프의 체

적변화를 구할 수 있다.

Fig. 6은 시간에 따른 펌프의 체적변화를 8개 위상에 대해 위상평균(phase average)하여 나타낸 것이다. 나비 펌프가 액체를 흡입하는 데 걸리는 시간은 약 0.2초이며, 식도로 방출하는데 걸린 시간은 약 0.1초로 나타났다. 나비 펌프의 체적 변화는 팽창기가 수축기보다 2배 정도 긴 것으로 나타났다. 펌프 체적의 최대값은 0.044 mm^3 이고, 최소값은 0.023 mm^3 이었다. 흡입에서 방출까지의 한 주기는 0.3초이며, 이로부터 구한 나비의 시간당 액체 섭취량은 약 $0.07 \text{ mm}^3/\text{s}$ 이다 (Fig. 6). 나비 펌프에서 역류하는 액체의 양은 무시할 정도로 작은 것으로 보였다. 4마리의 나비로부터 평균하여 구한 펌핑 주파수와 각 단계 별 펌프 체적을 정리하여 Table 1에 나타내었다.

3.3 나비 펌프 내부 압력구배

4마리의 나비로부터 평균하여 구한 유량값을 식(1)에 대입하여 계산한 압력구배 ΔP 값은 약 $144.63 \pm 41.51 \text{ kPa}$ 이다. 나비 침 내부에 걸리는 압력차가 1기압보다 크게 되면 나비가 액체를 빨아들이기 위해서 펌프 근육이 상당한 음압(negative suction pressure)을 발생시켜야 함을 의미한다. 이처럼 큰 음압이 필요한 이유는 나비 침의 경우 직경에 대한 길이의 비(l/d)가 171.42 정도로 매우 크고, 과즙 대응으로 사용한 요오드 용액의 점도가 상대적으로 높기 때문으로 보인다.

Table 1. Phasic and volumetric variations of the pump organ during liquid-feeding of living butterflies

Pumping frequency (Hz)	Intake stage(ms)	Ejection stage(ms)	Volume _{max} (mm ³)	Volume _{min} (mm ³)	Q(mm ³ /s)
2.37±0.691	0.331±0.134	0.115±0.0329	0.0467±0.0108	0.0233±0.00247	0.0531±0.0145

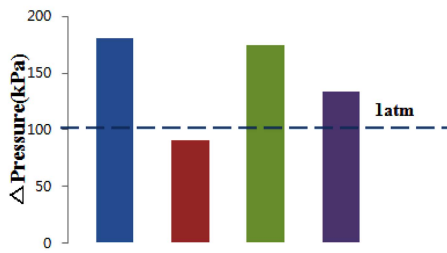


Fig. 7. Pressure gradient in the proboscis of four butterflies.

나비 칩 내부에 걸리는 압력차가 1기압보다 크게 되면 나비 칩 내부에서 캐비테이션이 발생하거나 칩의 형태가 변형되어 액체 이송의 효율성이 떨어질 수 있다. 따라서 나비 칩은 단순한 형상의 도관이 아니며, 높은 압력구배를 견뎌내기에 적합한 구조를 가지고 있거나 아니면 유체 전도성(fluid conductance)이 높은 특수한 구조를 가지고 있을 가능성이 있으며,⁽⁵⁾ 향후 이 부분에 대한 자세한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 X선 CT 장치를 이용하여 나비 뿔프의 3차원 구조를 관찰하고 미세 X선 영상기법을 이용하여 액체를 섭취하는 나비의 머리 속에 위치한 근육 뿔프의 주기적인 수축과 팽창 과정을 가시화 하였다. 이로부터 나비가 액체를 흡입하는 과정을 관찰하였으며, 나비 뿔프를 타원체 구조로 가정하여 시간에 따른 나비 뿔프의 체적 변화를 해석하고 뿔프가 나비 칩 내부에 형성시키는 압력구배를 구하였다. 나비 칩 내부에 형성되는 압력구배의 평균값은 1기압보다 큰 것으로 나타났는데, 이것으로부터 액체 흡입시 나비 뿔프가 매우 큰 음압을 생성시킴을 알 수 있다. 나비의 액체 흡입 과정은 약 0.3초의 주기를 가지며, 팽창기가 수축기간에 비해 2배 정도 긴 것으로 나타났다. 향후 연구에서는 나비 뿔프와 칩 내부 유동을 동시에 가시화하여, 나비의 액체 섭취 메커니즘을 보다 자세히 연구하고자 한다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부/한국연구재단 창의적연

구진흥사업 (생체유동현상 규명 및 생체모방연구)의 지원으로 수행되었습니다. 그리고 X선 영상 실험은 포항공속기 연구소(PAL)의 1B2와 7B2의 빔라인에서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Borrell, B. J., 2006, "Mechanics of nectar feeding in the orchid bee *Euglossa imperialis*: pressure, viscosity and flow", *J. Exp. Biology*, Vol. 209, pp.4901-4907.
- 2) Eastham, L. E. S., Eassa, Y. E. E., 1950, "The Feeding Mechanism of the Butterfly *Pieris brassicae* L." *Phil. Trans. R. Soc. Lond. B*, Vol. 239, pp.1-43.
- 3) Daniel, T. L., Kingsolver, J. G. and Meyhöfer, E., 1989, "Mechanical determinants of nectar-feeding energetics in butterflies: muscle mechanics, feeding geometry, and functional equivalence", *Oecologia*, Vol. 79, pp.66-75.
- 4) May, P. G., 1985, "Nectar uptake rates and optimal nectar concentrations of two butterfly species", *Oecologia*, Vol. 66, pp.381-386.
- 5) Monaenkova, D. *et al.*, 2011, "Butterfly proboscis: combining a drinking straw with a nanosponge facilitated diversification of feeding habits." *J. R. Soc. Interface*, doi:10.1098/rsif.2011.0392 Published online.
- 6) OCTOPUS homepage: <http://www.xraylab.com>
- 7) AMIRA homepage: <http://www.amira.com>
- 8) Kim, S. G., Lim, J. H., Kim, B. H., Lee, E. J. and Lee, S. J., 2010, "Development of X-ray micro computed tomography and application", *Journal of KSV*, Vol. 8, pp.45-50.
- 9) Kim, B. H., Kim, H. K., and Lee, S. J., 2011, "Experimental analysis of the blood -sucking mechanism of female mosquitoes", *J. Exp. Biology*, Vol. 214, pp. 1163-1169.
- 10) Westneat, M. W., Betz, O., Blob, R. W., Fezzaa, K., Cooper, W. J., and Lee, W. K., 2003, "Tracheal respiration in insects visualized with synchrotron X-ray imaging", *Science*, Vol. 299, pp. 558-560.
- 11) Westneat, M. W., Socha, J. J., and Lee, W. K., 2008, "Advances in biological structure, function, and physiology using synchrotron X-ray imaging", *Annu. Rev. Physiol.*, Vol. 77, pp. 119-42.