

# 벌새 날개짓을 모방한 왕복 진동형 추진기구 개발과제 소개

신유환\* · 최항철\*\* · 김광호\*\*

## 1. 서론

최근 선진국에서는 생체시스템의 다양한 기능들을 인위적으로 모방 응용하여 이를 공업적으로 이용하고자 하는 “생체모방기술 (Biomimetic Technology)” 이라는 미래 첨단생명공학분야 기술개발을 위해 막대한 연구 개발비를 투자하고 있다. 즉, 새로운 기술개발이 한계에 다다랐을 때 그 해결책을 생체 시스템에서 찾자는 새로운 패러다임이다.

5세기 이탈리아의 레오나르도 다 빈치는 과학적인 측면에서 하늘을 나는 새를 관찰하고 설계한 비행기 도면을 남겼으며, 19세기 릴리엔탈은 인간이 날 수 있는 기구개발에 새의 날개짓을 관찰하여 적용하고자 하였다. 또한 라이트 형제는 대머리수리의 비행을 보고 비행기를 만들었다. 이처럼 인간은 하늘을 나는 새에 대한 모방에 관심을 컸으나, 생체모방공학이라 할 수 있을 만큼의 정교한 작업이 가능해진 것은 아주 최근의 일이다.

벌새의 경우에는, 일반적인 새들의 비행방식과는 달리, 독특한 날개 형상과 날개 짓으로 양력과 추진력을 적절히 제어하여 한자리에서 쉽게 떠 있을 수 있으며 다른 새들과는 달리 공중에서 정지, 전후, 좌우 비행이 자유롭다. 벌새는 조류 중에서 가장 작은 새이며, 날개를 빠른 속도로 움직여서 경쾌하게 공중 비행을 하는 특징을 가지고 있다.

단순한 고정날개를 이용하는 현재의 항공기술은 대형의 비행체에는 잘 적용되어 왔으나, 벌새나 곤충 크기 정도의 초소형 비행체에 적용하기에는 많은 문제점을 안고 있다. 수 cm의 소형 비행체의 추진기구를 위해 비슷한 크기의 벌새의 비행메커니즘 연구를 통한 새로운 추진기구의 개발이 필요하다. 그리고 본 기술 개발을 통해 생체의 특성을 이용한 새로운 기계시스템

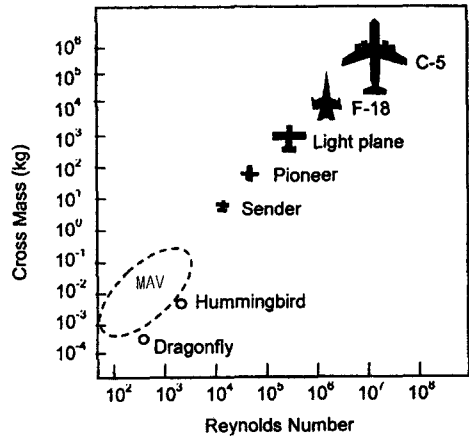


Fig. 1 비행체의 무게와 레이놀즈 수와의 관계 (McMichael & Francis, 1997)<sup>(1)</sup>

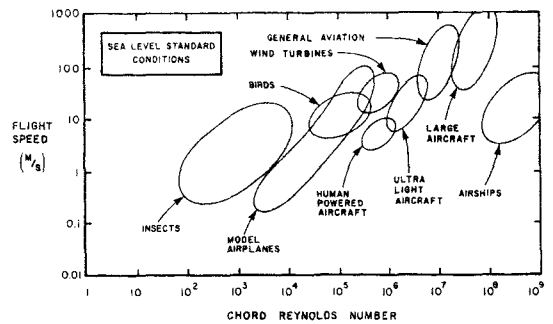


Fig. 2 비행체의 속도와 레이놀즈 수와의 관계 (Lissamann, 1983)<sup>(2)</sup>

의 개발로 인한 기술파급효과 및 활용도에 있어서의 잠재력은 매우 클 것으로 기대된다.

Fig. 1은 비행체의 무게와 레이놀즈(Reynolds) 수의 관계를 보여 주고 있으며, Fig. 2는 비행체속도와 레이놀즈 수와의 관계를 보여 주고 있다. 이 그림들로부터 일반적인 항공기의 경우, 비행 Reynolds 수는  $10^6$  이상의 영역에 있음을 알 수 있다. 또한 고성능 익형의 개발과 같은 대부분의 공기역학적 연구도 이 영역에 집중 되어있다. 그러나 최근 관심을 가지고

\* 한국원자력연구소 기계공학연구부  
 \*\* 한국원자력연구소 원자로공학연구부  
 E-mail: mhkim@kaeri.re.kr

말하기 시작한 MAV의 비행영역은 Figs. 1과 2에서와 같이 레이놀즈 수가  $10^4$  이하임을 알 수 있으며 이 영역은 작은 새와 곤충의 비행영역과 같다는 것을 알 수 있다.

## 2. 연구개발 현황

“Flapping wing”을 이용한 비행체 개발에 관한 연구는 자연의 비행 생물, 즉 파리, 잠자리들과 같은 곤충이나 벌새의 날개 짓을 모방한 추진기관의 연구로서 학교와 연구소들 중심으로 기초연구가 진행되고 있다. 현재까지는 고정된 날개 또는 회전익 주위의 유동 해석에 관한 연구가 많이 진행되었으며 1차적으로 이러한 해석 모델들을 곤충이나 복잡한 새들의 날개 움직임 표현에 활용하고 있다. 그러나 아직 만족스럽지 못한 상황이며 최근에는 이러한 복잡한 운동해석에 적합한 해석 모델들이 제시되고 있다. 이러한 새로운 개념의 모델로는 aerodynamic delayed stall model, rotational circulation mechanism, wake capture model들이 있다.

이 분야의 연구는 영국 Cambridge 대학의 C. Ellington 교수를 시작으로 수행되었으며, 같은 영국의 Exter 대학의 R. Wootton 교수, Leeds 대학의 J. Rayner 교수팀 등에서 지속적으로 연구되고 있다. 독일에서는 Saarbruecken 대학의 W. Nachtigall 교수, Goettingen 대학의 W. Zarnack 교수팀들이 연구를 수행하고 있으며, 이어서 미국에서도 최근 들어 Berkeley 대학의 R. Fearing 교수팀, Caltech의 M. Dickinson박사 연구팀들이 파리의 비행을 모사할 수 있는 추진체를 연구하고 있다. 독일 Ulm의 F. Lehmann 교수팀에서도 유사한 연구를 시작하고 있다.

이들 연구인력들은 대부분 생물학, 동물학, 생태학 등을 연구한 학자들로서 이러한 분야를 중심으로 연구 활동이 전개되어 왔으나 최근 들어서는 공학적인 개념을 접목하여 MAV 등 실제적인 응용분야를 그 대상으로 연구를 수행하고 있다.

날개 움직임의 해석을 위한 해석모델로서 기존의 항공역학적 모델을 적용하고 있으나 부족한 면이 많다. 기존의 해석모델은 정상상태의 유동장 (steady state) 해석에 적합하도록 발전되어 왔으나 곤충, 새 등의 날개짓은 비정상상태 (unsteady state) 의 유동현상으로서 이러한 복잡한 운동해석에 적합한 새로운 개념의 모델이 제시되어야 할 것이다. 최근들어 동적실속(dynamic stall), 실속지연(delayed stall),

회전순환(rotational circulation) 등의 모델들이 제시되고 있으나 아직은 좀더 규명되어야 하고 실험적으로 검증되어야 할 필요가 있다. 또한, 이와 같은 이론적 연구 외에도 actuator를 이용하여 모형날개를 만들고 그 움직임을 모사한 다음 그 모델에 대해 유동장 가시화, 유동장 측정 등 실험적 측면에서도 접근되고 있다.

이러한 flapping device의 실용화를 위해서는 위에 언급한 공력학적인 연구 외에도 actuator 및 구동 mechanism에 대한 연구, 적절한 재료 개발에 관한 연구가 수행되어야 하며 이러한 분야의 원천기술은 아직도 많이 부족한 상황이다.

파리의 경우, 공기역학적 비행 능력은 상상을 초월할 정도로 우수하다. 파리의 이동과 항법능력에 대한 원리를 밝혀내 하드웨어로 재구현하면 만능 곤충로봇을 만들 수 있을 것이다. 이러한 파리의 비행에 관한 연구는 앞에서 언급한 것 같이 미국 Caltech의 Dickinson박사 연구팀에 의해서 수행되고 있다. 이 연구팀은 파리의 비행 kinematics를 분석하여 Fig. 3과 같은 Robofly라는 실험용 모형을 이용해 파리의 운동을 재현하고 이때 날개에서 발생하는 힘과 날개 주위의 유동을 측정하여 비행 mechanism에 대한 연구를 수행하고 있다. 파리의 비행을 모사하기 위해서 피에조 일렉트릭을 이용한 구동장치를 개발하고 있다. 그리고 PZT 구동장치는 Berkeley의 R. S. Fearing 교수팀과 공동으로 연구하고 있다. 이러한 연구는 주로 미국의 국방관련 연구로서 DARPA의 지원을 받고 있으며 아직은 실용화된 결과는 없지만 부분적으로 많은 진전을 보이고 있다.

미국 Georgia Tech.의 Robert C. Michelson 교수팀은 Fig. 4의 Entomopter라는 새의 날개형상을 갖는 비행체에 대한 연구를 수행중이다. 이 비행체

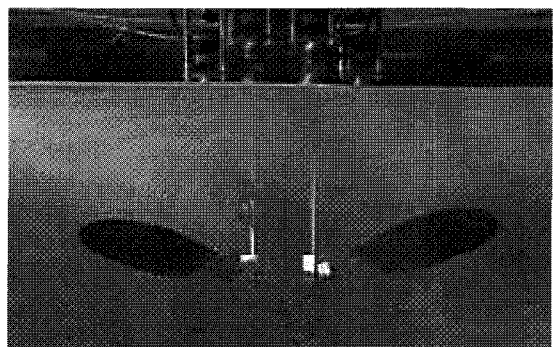


Fig. 3 Caltech의 Robofly 모델<sup>(3)</sup>



Fig. 4 Georgia Tech의 Entomopter<sup>(4)</sup>

는 chemical muscle에 의해서 구동된다고 알려져 있다.

영국의 Cranfield 대학에서도 Fig. 5와 같이 flapping motion을 갖는 인조날개에 대한 연구를 진행하고 있다. 날개의 뼈대를 모사한 구조를 만들고 거기에 플라스틱 살을 입힌 형태로 제작되었으며, 미국의 Georgia Tech.과도 협력관계를 유지하고 있다. 미국 Caltech.의 Y. C. Tai 교수 연구팀과 UCLA의 C. M. Ho 교수팀에서는 Fig. 6과 같이 초소형 비행체의 날개로 박쥐에서 모방한 날개, Micro Bat의 시제품을 만들어 그 특성을 실험적으로 연구하고 있다. 이 날개는 티타늄 합금, 폴리머 등을 소재로 하며, 약간의 유연성을 가지고 있다. 실험결과에 의하면 이러한 날개의 유연성이 양력 및 추진력 향상에 도움을 주는 것으로 파악되고 있다. 또한 여기에 MEMS 가공을 이용하여 미세 actuator valve를 부착하여 날개 주위의 유동장을 제어하고 이를 통해서 양력의 증대를 가져올수 있다고 발표한 바 있다.



Fig. 5 Cranfield 대학의 Fly Wing 시제품<sup>(5)</sup>

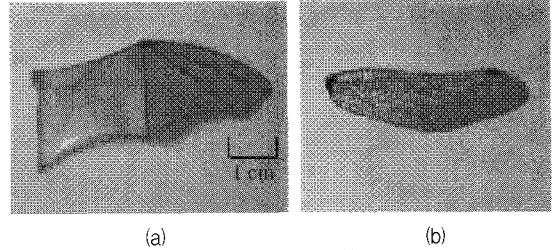


Fig. 6 Caltech.의 Micro Bat 날개형상<sup>(6)</sup> : (a) Silicon bat wing and (b) silicon dragonfly wing

### 3. 벌새 날개의 운동 특성

#### 3.1 벌새의 비행 특성

벌새의 정지비행 특성과 헬리콥터의 비행모드를 비교해 보면, 벌새의 경우 날개가 아래 위, 혹은 앞뒤로 왕복 진동하고 헬리콥터의 로터는 제자리에서 회전하는 차이가 있지만 비행 모드는 비슷하다. 헬리콥터는 로터를 수평면과 평행하게 해서 수직 이착륙과 정지비행을 하며, 전진이나 후진 비행을 할 때는 로터를 진행방향으로 기울여서 진행 방향으로의 추진력을 발생 시킨다.

벌새는 정지 비행 시, 수평방향을 기준으로 날개를 앞뒤로 움직인다. Fig. 7의 그림과 같이 아래(앞 또는 배)로 날개 짓을 할 때 날개는 앞쪽으로 앞전(leading edge)을 길게 하고 깃털은 위쪽으로 하여 작은 양(+)의 받음각을 만든다. 위(뒤 또는 등)로 날개 짓을 할 때는 앞전은 거의 180도로 회전하고 뒤쪽으로 움직인다.

#### 3.2 날개 운동 특성 변수

벌새 날개의 움직임을 표현하고 그 운동특성을 나

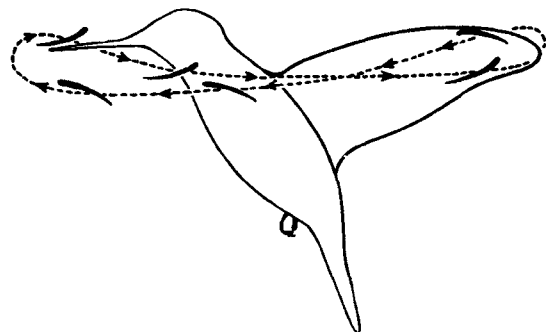


Fig. 7 벌새의 정지비행 상태에서의 flapping 운동 (Ellington, 1984)<sup>(7)</sup>

타내는 주요 특성 변수들로는 날개 진동수, flapping 운동과 stroke 면, deviation, wing rotation들이 있다.

### 3.2.1 날개 진동수

날개 진동수(wing beat rate)는 진동시스템의 무게와 길이 그리고 복원력(근육의 탄성력)에 의해 결정된다. 가장 효율적인 추진력을 내기 위해서는 감쇄 저항을 극복하기 위한 추진력을 고유진동수에 맞게 가해 주는 것이다. 따라서 비행 모드가 바뀌더라도 각자의 날개 진동수는 크게 변화하지 않는다. Ruby throat 벌새의 경우 보통 52 Hz 정도의 날개 진동수를 가지고 있으며 비행 모드가 바뀌어도 5% 이내의 변화를 유지한다. 그러나 착륙을 하거나 적을 피하기 위해 기동비행을 할 때는 날개 진동수를 크게 함으로써 효율은 손해지만 큰 추진력을 얻게 된다.

### 3.2.2 Flapping 운동

Flapping 운동은 비행 중인 새나 곤충이 추진력과 양력을 얻기 위한 가장 주된 동작이다. 운동 방향에 따라 뒤(위 또는 등) 쪽에서 앞(아래 또는 배)으로 움직이는 downstroke와 그 반대 동작인 upstroke가 있다. 이러한 운동은 일정한 궤적을 그리게 되는데 실제로 그 궤적은 하나의 평면으로 존재하지 않고 날개의 끝을 보면 Fig. 8의 정지 비행 및 전진 비행에서 보듯이 타원형과 같은 궤적을 그린다. 날개운동 해석의 편리성을 위해서 Fig. 8과 같이 이러한 궤적의 평균적인 운동면을 stroke 면으로 정의하게 된다. 또한 평균 stroke 면과 수평면과 이루는 각도는 Fig. 8과 같이 경사각(stroke plane angle)  $\beta$ 로 정의 한다.

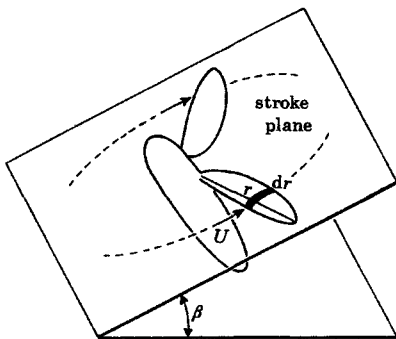


Fig. 8 Stroke 면의 경사각(Ellington, 1984)<sup>(7)</sup>

## 4. Flapping Wing의 양력 발생 원리

벌새는 flapping wing의 양력발생 원리 중에 지연성 실속(delayed stall), 회전에 의한 순환(rotational circulation)과 후류 포획(wake capture)을 이용하여 비행한다.

### 4.1 지연성 실속

날개가 병진운동(translational motion)을 하는 경우에 생기는 것으로 일반적인 고정익 항공기 보다 큰 받음각(angle of attack)으로 비행을 하게 된다. 받음각이 커짐에 따라 앞전(leading edge)에서 유동의 박리(separation)가 생기게 되며 이것이 다시 재부착 되면서 앞전 와류(leading edge vortex)를 만들고 Kutta 조건을 만족하게 된다. 이 경우 유체에 downward momentum을 더 크게 가하여 양력이 커지게 된다.

### 4.2 회전에 의한 순환

전진하고 있는 물체가 회전을 하게 되면 양력(lift)이 발생하는 Magnus effect(Fig. 9)처럼 날개 끝에서 날개가 회전을 하면서 양력을 얻는 방식이다. 이 경우 회전 시기(advanced, symmetric, delayed rotation)에 따라 공력의 방향이 변하므로 up stroke와 down stroke 동안에 날개의 회전 시기가 중요하다.

## 5. Flapping Wing 추진기구

벌새 날개짓 운동메커니즘에 대한 연구를 수행하여

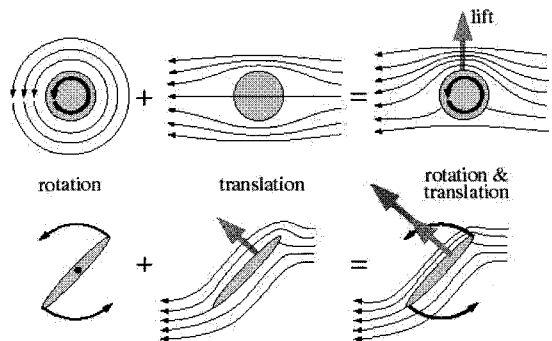


Fig. 9 Magnus effect와 rotational circulation의 원리<sup>(8)</sup>

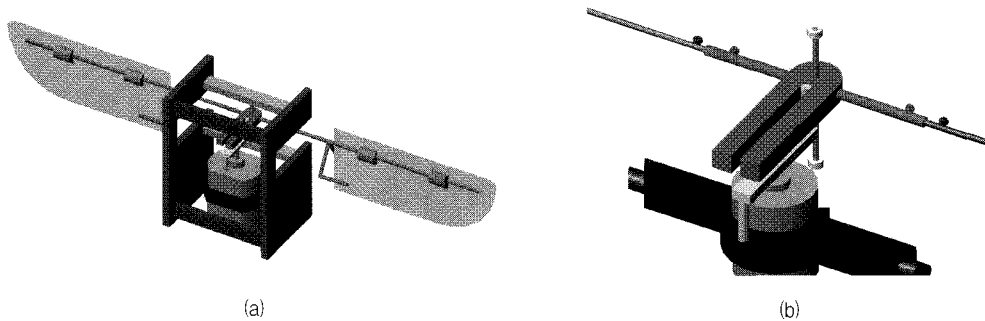


Fig. 10 Motor-crank actuator 구조<sup>9)</sup> : (a) Motor-crank actuator and (b) Crank-link 구조

제시된 벌새의 날개짓의 운동특성을 제시하였고, 이를 모방하는 메커니즘을 설계, 제작하고 시험을 수행하였다. 벌새의 정지상태 flapping 운동의 특징 중에서도, 날개의 왕복 진동운동과 이의 위상에 따른 적절한 날개의 비틀림 운동을 모사한 장치를 설계 하였다. 이러한 특징이 결국 날개에서 양력을 증대시키는 효과를 준다.

Fig. 10은 flapping wing의 추진을 모사하는 기구로 제작된 Motor-crank actuator를 나타낸 것으로서 초소형 모터를 이용한 crank-link 구조로 되어 있으며, 날개의 flapping과 rotation 운동을 동시에 구현할 수 있도록 설계되었다. 이는 PZT 방식에 비해서 큰 힘을 낼 수 있고 운동을 손쉽게 제어할 수 있다는 장점이 있어 공력학적 parameter 실험에 최적이다. 공급되는 DC 전압에 의해 진동수가 조절되고, 5 Hz~20 Hz까지 구동 가능하며 크기는 26 mm × 42 mm × 57 mm이다.

## 5.1 Flapping Wing 구동 시험

### 5.1.1 PZT Bender Actuator

최종적으로 본 시제품에서는 장치의 복잡성을 줄여

구동원의 진동을 1회만 증폭 하여 flapping 운동을 하는 기구를 제작하였으며, 구동력을 증대시키는 설계 개념을 적용하였다. 여기에 사용된 PZT actuator는 Noliac A/S 사의 CMBP9를 사용하였으며, 제원은 가로 23 mm, 세로 59 mm, 높이 13 mm이고, 무게는 2개의 PZT actuator를 포함하여 15.46 g, 최대 날개 회전 torque는 4.77 Nmm를 가진다.

시험 결과 최대 15 Hz의 날개 진동수와 최대 45 degree의 날개 stroke 각도를 얻었으며 (Fig. 11 참조), 양쪽 날개에서 발생하는 추진력에 의해 수평 밸런스 상에서 움직임을 확인 하였다. 추진력은 0.15~0.64 g 으로 측정되었다.

### 5.2.2 Motor-Crank Actuator

PZT 방식의 시제품 외에, 추가로 DC motor를 이용한 구동장치를 제작하여 실험하였다. 이는 초소형 모터와 crank-link mechanism을 이용한 방식으로 날개의 flapping과 rotation 운동을 손쉽게 제어할 수 있어 유리하다.

제작된 장치에 대해서 추진력 확인 시험을 위해 6분력 센서를 사용하였다. 센서로는 ATI 사의 DAQ

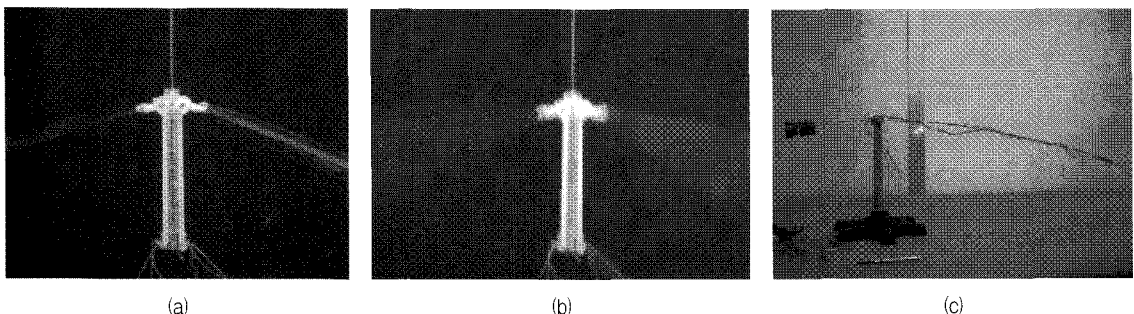
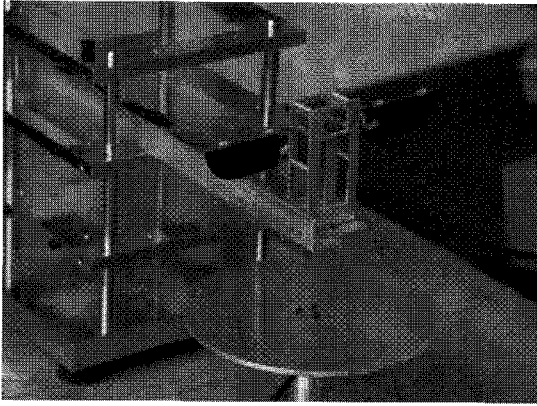
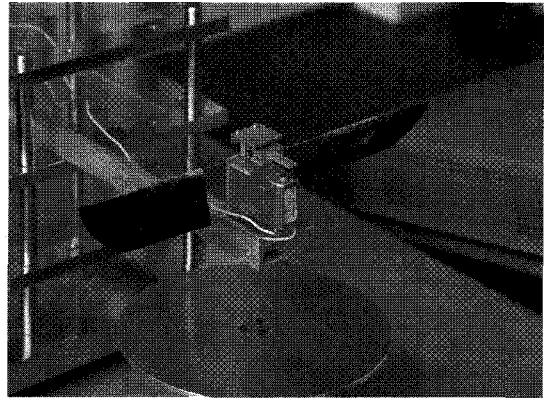


Fig. 11 PZT bender actuator test<sup>9)</sup> : (a) PZT 시제품, (b) Stroke, 진동수 시험 and (c) 추진력 시험장치



(a)



(b)

Fig. 12 Flapper 및 추진력 측정을 위한 풍압관<sup>®</sup> : (a) PZT 구동 방식 flapper and (b) Motor-crank 방식 flapper

F/T 모델을 사용하였다. 측정하려는 추진력의 크기가 수 g 정도의 매우 작은 값이기 때문에 장치의 진동으로 인해 직접 측정이 어려우며, 따라서 여기에서는 날개를 지나 아래로 흐르는 공기의 풍압을 측정하고 이를 추진력으로 환산하는 방식을 이용하였다. (Fig. 12 참조)

이 결과 DC motor 구동방식에서 15 Hz 정도의 구동속도에서 약 0.7 g의 추진력을 확인하였다.

## 6. 결론

본 연구는 생체시스템의 다양한 기능들을 모방 응용하여 이를 공학적으로 이용하고자하는 생체모방기술 (Biomimetic Technology) 이라는 미래 첨단생명공학분야 기술개발을 위한 한 분야로서, 기존의 회전형 프로펠러 혹은 스크류 방식의 추진기관과는 다른, 왕복 진동방식의 생체운동에 관한 기초연구이다.

이를 위하여 벌새의 동작에 대한 체계적인 분석을 수행하여 운동 mechanism을 파악하고, 이를 모방한 왕복 진동형 운동에 관하여 kinematic 해석 및 공기역학적인 해석을 수행하여, 날개의 flapping motion이 가능한 효율적인 추진기구의 아이디어를 개발하고 장치의 제작, 시험을 통하여 추진력을 확인하였다.

향후 실제로 비행 가능한 추진기구 개발을 위해서는 추진력의 증대뿐만 아니라 자체 중량의 감소도 이루어져야 한다. 추진력의 증대를 위해서는 flapping mechanism의 개선 및 actuator의 성능 향상을 통해서 좀더 효율적으로 날개짓의 진폭을 증대 시켜야

하며 진동 속도 역시 증가 되어야 한다.

## 참고문헌

- (1) McMichael, J. M. and Francis, M. S., 1997, "Micro Air Vehicles - Toward a New Dimension in Flight," <http://www.darpa.mil/tto/mav/mav-auvsi.html>.
- (2) Lissamann, P. B. S., 1983, "Low-Reynolds Number Airfoils," *Ann. Rev. Fluid Mech.*, Vol. 15, pp. 223~239.
- (3) [http://www.dickinson.caltech.edu/research\\_robotfly.html](http://www.dickinson.caltech.edu/research_robotfly.html)
- (4) <http://avdil.gtri.gatech.edu/RCM/RCM/Entomopter/Entomopter Project.html>
- (5) <http://www.rmcs.cranfield.ac.uk/daps/guidance/microairvehicles/view>
- (6) Pornsin-Sirirak, T. N., Lee, S. W., Nassef, H., Grasmeyer, J., Tai, Y. C., Ho, C. M. and Keennon, M., 2000, "MEMS Wing Technology for A Battery-Powered Ornithopter," The 13th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '00), Miyazaki, Japan, pp. 799~804.
- (7) Ellington, C. P., 1984, "The Aerodynamics of Hovering Insect Flight: I. The Quasi-Steady Analysis," *Phil. Trans. R.*

Soc. London, series B, Vol. 305, pp. 1~15.

(8) <http://ist-socrates.berkeley.edu/~fly-mann/>

(9) 김광호 외, 2004, “벌새 날개짓을 모방한 왕복 진동형 추진기구 연구,” 한국과학기술연구원, UCN 2557-7510-2.