

곤충의 호버링 비행을 구현하는 메카니즘의 설계

정세용*(연세대학교 대학원 기계공학과), 최용제(연세대학교 기계공학과)

Design of a Mechanism for Reproducing Hovering Flight of Insects

S. Y. Jung(Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.), Y. J. Choi(Mech. Eng. Dept., Yonsei Univ.)

ABSTRACT

Recently, studies have been carried out to develop unmanned Micro Air Vehicles(MAVs) that can search and monitor inside buildings during urban warfare or rescue operations in hazardous environments. However, existing fixed-wing and rotary-wing MAVs cannot travel at extremely low or high speeds, hover in place, or change directions instantly. This has lead researches to search for other flight methods that could overcome those drawbacks. Insect flight principles and its applications to MAVs are being studied as an alternative flight method. To take flight, insects flap and rotate their wings. These wing motions allow for high maneuverability flight such as hovering, vertical take off and landing, and quick acceleration and deceleration. This paper proposes a method for designing a mechanism that reproduces hovering insect flight, the basis for all other forms of insect flight. The design of a mechanism that can reproduce the motion that causes maximum lift is proposed, the required specifications are calculated, and a method for reproducing hovering insect flight with a single motor is presented. Also, feasibility of the design was confirmed by simulation.

Key Words : Micro Air Vehicle(초소형 비행체), hover(호버링·정지비행), insect flight principles(곤충 비행원리), flap(날개짓), lift(양력)

1. 서론

곤충의 비행은 우리에게 알려진 비행 형태 중 기동성이 가장 뛰어나다. 수직 이착·륙은 물론, 옆으로 날거나 뒤로 날 수도 있고, 한 순간에 90도 이상 방향전환을 할 수도 있다. 이러한 비행형태는 기존의 고정익 또는 회전익 비행체가 기동성 면에서 갖는 단점을 보완할 수 있을 것이다. 특히 시가전, 위험지역에서의 구조작전, 첩보활동, 교통관리 등 협소한 공간에서 눈에 띄지 않게 호버링(hovering) 또는 빠른 가·감속 및 방향전환 비행을 해야 하는 비행체에 곤충의 비행원리를 응용함으로써 기동성이 뛰어난 비행체를 개발할 수 있을 것이다.

곤충의 비행원리는 날개의 개수나 곤충의 크기 및 종류에 따라 조금씩 다르며, 곤충의 크기가 작을 수록 기동성이 뛰어난 면을 보인다. 특히 초파리(Drosophila Melanogaster)와 같은 작은 곤충류의 비행형태가 기동성이 가장 뛰어나다. 이러한 작은 곤충

류는 비행 시 날개짓(flapping)을 함과 동시에, 날개짓을 위에서 아래로, 아래에서 위로 전환할 때 날개를 회전(wing rotation)시키고, 이런 동작은 빠른 속도로, 낮은 레이놀즈 수에서 이루어진다. 곤충은 이러한 비행 형태를 통해서 지연된 실속(delayed stall), 회전 순환(rotational circulation), 후류 포착(wake capture) 등의 현상을 유발하여 추진력, 양력 및 방향 전환에 필요한 힘을 얻게 된다⁽¹⁾. 이를 이용해서 곤충은 날개짓의 폭(stroke amplitude), 날개회전의 시작 시기, 스트로크 평면(stroke plane)에서 벗어난 정도 등을 조절하여 다양한 형태의 비행을 하게 된다.

앞서 설명한 곤충 비행의 장점을 활용하기 위해 곤충의 비행원리에 대한 연구가 진행되어 오고 있으며, 이를 응용한 비행체가 개발되고 있다. 특히 Caltech의 M.H. Dickinson⁽¹⁾과 Cambridge의 C.P. Ellington⁽²⁾에 의해 각각 초파리와 나방의 비행원리에 관한 연구가 진행되어 왔다. Dickinson은 ‘Robofly’⁽¹⁾라는 초파리 모양의 확대된 실험장치를 이용해서 곤

충비행 시 발생하는 여러 유체역학적 현상을 밝혀냈다. 또한, 미국 UC Berkeley의 R.S. Fearing⁽²⁾은 실제 초파리 크기에 초파리와 유사한 날개 동작을 구현할 수 있는 ‘MFI(Micromechanical Flying Insect)’라는 비행체를 개발 중이다.

본 논문에서는 곤충 비행원리에 관한 연구의 시초가 되는 곤충의 호버링 비행을 구현할 수 있는, 즉 날개짓하며 날개를 회전시킬 수 있는 메카니즘의 설계 방법을 제시하였다. 초파리의 여러 가지 비행 동작 중 최대 양력이 발생하는 동작을 단일 모터로 구현할 수 있도록 메카니즘을 설계하였고, 호버링에 요구되는 속도를 계산하였다. 또한 시뮬레이션을 통해서 설계된 메카니즘의 실현 가능성을 확인하였다.

2. 연구 배경

2.1 곤충의 비행원리

곤충은 비행할 때 3가지 주요 유체역학적 현상(지연된 실속, 회전 순환, 후류 포착)을 이용해서 양력 및 방향전환에 필요한 힘을 발생시킨다⁽¹⁾. 이중 지연된 실속은 곤충의 날개짓에 의해 발생되고, 회전 순환과 후류 포착은 날개 회전에 의해 발생된다.

2.1.1 지연된 실속

지연된 실속은 곤충이 날개짓하는 과정에서 발생되는 현상이다. 곤충이 날개짓할 때, 날개의 받음각(angle of attack)이 높지만 실속이 늦게 발생하는 특징을 갖는다. 이 때 날개는 헬기의 회전익과 같이 곤충의 몸에 수직인 축을 중심으로 회전하기 때문에 몸에서 날개 끝 방향으로 날개의 축을 따라 유동(axial flow)이 발생된다. 이 유동이 날개의 앞전(leading edge)에 발생한 와류(vortex)의 박리(separation)를 막아주면서 실속을 늦추게 된다. 이와 같이 실속을 지연시킴으로써 받음각이 커져도 양력을 크게 지속시킬 수 있게 된다.

2.1.2 회전 순환

회전 순환은 곤충이 날개짓을 위에서 아래로, 아래에서 위로 전환하는 과정에서 날개를 회전시킬 때 발생하는 현상이다. 곤충이 날개를 회전시킬 때 날개의 앞전은 날개의 진행방향의 반대 방향으로 움직이고, 뒷전(trailing edge)은 날개의 진행방향과 같은 방향으로 움직인다. 그래서 날개의 윗부분의 유속이 아랫부분보다 높아져 매그너스 효과(Magnus Effect)에 의해 양력이 발생하게 된다.

2.1.3 후류 포착

후류 포착은 곤충이 날개를 회전시킨 직후 날개짓의 진행방향이 바뀔 때 동시에 발생하는 현상이다.

곤충이 한 방향으로 날개짓했을 때 날개가 지나간 공간에 후류가 발생하게 된다. 날개를 회전시키고 날개짓의 방향이 바뀌는 순간, 전에 발생했던 후류가 날개에 힘을 전달해서 양력이 증가하게 된다.

2.2 Robofly

Robofly는 Dickinson이 초파리가 비행할 때 날개 주변에 발생하는 유체역학적 현상을 관찰하고 힘을 측정하기 위해 개발한 실험장치이다. Robofly의 형상은 초파리와 같지만 한쪽 날개의 길이가 25cm로서 매우 크며, 날개를 기름통 안에 설치했고 초파리와 같은 동작으로 느리게 움직일 수 있도록 설계하였다. Robofly가 동작할 때 레이놀즈 수(Reynolds number)가 실제 초파리와 일치하게 하여 날개 주변의 유체 흐름을 관찰하고 발생하는 힘을 측정할 수 있도록 고안하였다.

Sane과 Dickinson⁽³⁾은 Robofly를 이용해서 191가지 날개 동작(kinematic patterns)에 대한 실험을 통해 각 동작에서 발생한 양력과 항력을 측정하여 최대양력을 발생시키는 동작을 밝혀냈다. 날개의 동작은 Fig. 1과 같이 날개짓의 폭 Φ , 받음각(angle of attack) α , 날개회전 시작(flip start) τ_0 , 날개회전 지속시간(flip duration) $\Delta\tau$, 스트로크 평면에서 벗어난 정도(plane deviation) Θ , 날개의 궤적(wing trajectory) 등 6개의 파라미터로 정의하였다.

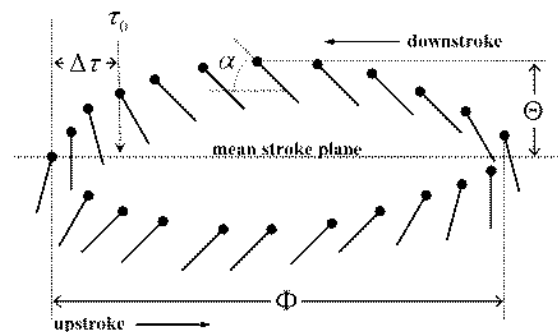


Fig. 1 Two-dimensional projection of the profile of a wing in motion.

여기서 검은 점은 날개의 앞전을 나타내며, 날개회전 시작 τ_0 와 날개회전 지속시간 $\Delta\tau$ 는 한 날개짓 주기(flapping cycle)의 비율로 나타내었다.

2.3 Micromechanical Flying Insect(MFI)

MFI는 Fearing⁽⁴⁾에 의해 실제 초파리와 크기, 무게, 날개짓 주기가 유사하게 개발된 비행체이다. MFI의 몸체는 구면 5절 기구(spherical 5-bar mechanism)와 이를 구동시키는 2개의 평면 4절 기구(planar 4-bar mechanism)로 구성되어 있다. 각 4절 기

구는 2개의 피에조 벤더(piezo-electric bender)로 구동시켜서 총 4개의 액츄에이터를 사용하게 된다. 현재까지는 한쪽 날개만 구동할 수 있는 단계까지 개발되었다.

2.4 호버링 질량 공식

Ellington⁽⁵⁾은 양력공식(lift equation)(1)으로부터 날개짓하는 비행체가 공중 부양할 수 있는 무게를 계산할 수 있는 식(2)를 유도하였다. 이 식은 다음과 같은 4개의 가정에 의해 단순화된 것이다. 날개짓하는 속도는 단순조화운동이고, 도심은 날개길이의 1/2 지점에 위치하여, 공기밀도는 표준값을 사용하고, 중력 가속도는 표준값을 사용한다.

$$L = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_L \quad (1)$$

$$m = 0.387 \frac{\Phi^2 n^2 R^4 \overline{C_L}}{A_R} \quad (2)$$

여기서, L 은 양력, ρ 은 밀도, U 는 속도, A 는 날개의 면적, m 은 질량, Φ 은 날개짓의 폭, n 은 초당 날개짓 횟수, R 은 날개의 길이, C_L 은 양력계수, $\overline{C_L}$ 은 평균 양력계수, A_R 은 날개의 종횡비이다. 식(2)는 곤충의 날개짓에 의해 발생한 양력만 고려한 것이고, 날개회전 시 비정상유동이 발생하기 때문에 공식으로 계산할 수 없다.

3. 메카니즘의 설계

3.1 설계목표

본 논문에서는 단일 모터로 구동시켰을 때, 최대 양력이 발생하는 동작을 구현할 수 있는 메카니즘을 설계하고자 하였다. Sane과 Dickinson이 RoboBly를 이용해서 191가지 날개 동작(kinematic patterns)을 서로 비교한 결과, 평균 양력계수가 가장 높았던 동작은 다음과 같다.

$\Phi : 180^\circ$, $\alpha : 45^\circ$, $\tau_0 : -0.05$, $\Delta\tau : 0.1$, $\theta : 0^\circ$
이 때 평균 양력계수 $\overline{C_L}=1.9$ 이다.

이와 같은 동작을 구면 5절 기구와 두 개의 평면 4절 기구로 구성된 메카니즘으로 구현하는 방법을 제안한다.

3.2 구면 5절 기구

Fig. 3(a)는 MFI에 사용된 2자유도 구면 5절 기구를 5개의 핀 조인트와 5개의 링크로 간단하게 나타낸 것이다. 구면운동기구의 다섯 조인트의 축은 모두 입력각(input angle) 1에서 만난다. 입력각 1과 2의 조인트를 움직여줌으로써 날개는 날개짓 축(flapping axis)을 중심으로 날개짓하고 날개 회전축(wing rotation axis)을 중심으로 날개를 회전시킨다.

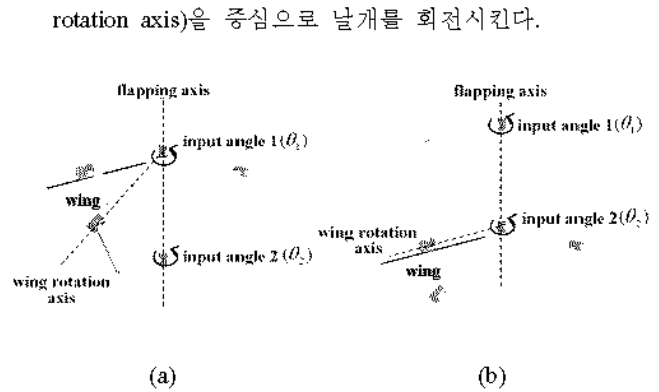


Fig. 3 (a)MFI spherical 5-bar mechanism (b)Proposed spherical 5-bar mechanism

MFI의 메카니즘의 경우 날개 회전축이 날개짓 축에 수직하지 않기 때문에 날개가 회전할 경우 날개가 스트로크 평면에서 벗어나게 된다. 본 논문에서 제안하는 구면 5절 기구는 Fig. 3(b)와 같다. 구면운동기구의 다섯 조인트의 축은 모두 입력각 2에서 만나며, 날개 회전축이 날개짓 축에 수직하기 때문에 날개는 항상 스트로크 평면상에서 움직여 최대 양력을 발생시키는 동작을 구현할 수 있다.

3.2.1 구면 5절 기구의 동작 해석

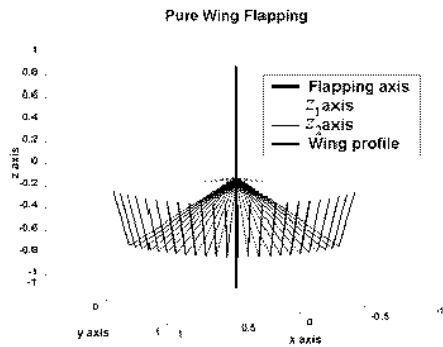
구면 5절 기구에 입력되는 입력각 1,2에 따라 날개가 움직이는 궤도를 확인하기 위해 좌표계의 원점을 입력각 2 지점에 두고 날개 단면의 동작을 도시하였다. 입력각 1, 2를 각각 θ_1 , θ_2 라 하고, 날개에 연결된 조인트 중 날개 회전축과 일치하는 축의 방향 벡터를 z_1 , 날개에 연결된 다른 조인트의 축의 방향 벡터를 z_2 라고 하면 순기구학 위치해석에 의해 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다. 여기서 z_1 과 z_2 의 사이각은 30° 이다.

$$z_1 = \begin{pmatrix} c\theta_1 \\ s\theta_1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

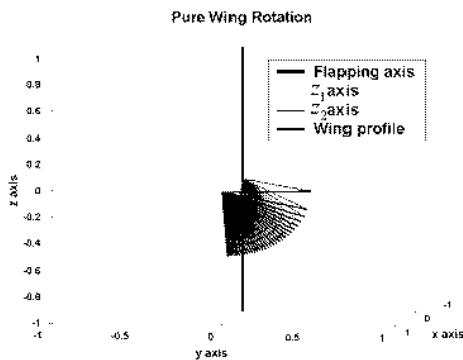
$$z_2 = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} c\theta_2 s(\theta_1 - \theta_2) \\ \frac{\sqrt{3}}{2} s\theta_2 s(\theta_1 - \theta_2) \\ -\frac{1}{2} \sqrt{(-1 + 2c[2(\theta_1 - \theta_2)])} s(\theta_1 - \theta_2)^2 \end{pmatrix} \quad (4)$$

※ $s \rightarrow \sin, c \rightarrow \cos$

이 때 날개의 단면이 그리는 궤적은 Fig. 4와 같다.



(a)



(b)

Fig. 4 (a) Pure wing flapping (b) Pure wing rotation

입력각 θ_1, θ_2 가 같을 때는 날개짓 동작만 이루어지고, 입력각이 다를 때는 날개를 회전시키게 된다. 입력각의 위상차가 22° 일 때 최대양력이 발생하는 날개의 받음각 45° 를 얻게 된다.

3.3 평면 4절 기구

구면 5절 기구의 운동학적 결과를 바탕으로 이를 구동시킬 메카니즘을 설계하였다. 날개짓하는 과정에서, 아래날개짓(downstroke)할 때 22° 의 위상차로 입력각을 주고, 윗날개짓(upstroke)할 때 -22° 의 위상차로 입력각을 줄 수 있는 메카니즘을 구현하기 위해 동시에 구동되는 두개의 크랭크 로커(crank-and-rocker)를 설계하였다. Fig. 5는 2개의 체원이 같은 크랭크 로커의 입력 링크 위상차를 22° 로 고정시키고 구동시키는 4절 기구의 개략도이다. 평면 4절 기구의 특성상 로커의 스트로크를 180° 로 구현하는 것이 불가능하기 때문에 구현 가능한 160° 로 설계하였다. 평면 4절 기구의 스트로크를 ϕ , 입력 링크의 길이를 i , 출력 링크의 길이를 o , 커플러의 길이를 c , 고정 링크의 길이를 g 라 할 때 동시간 전후진 크랭크 로커(equal time forward and back crank-and-rocker)의 링크간의 관계식은 식(5),(6)과 같다.

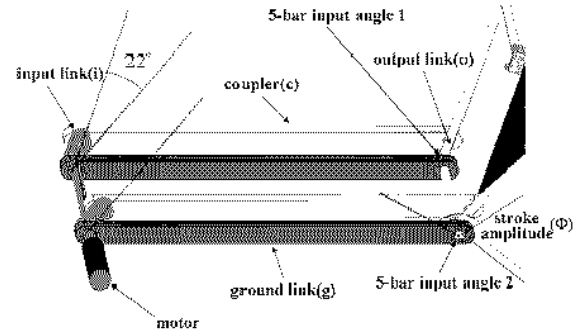


Fig. 5 Double crank-and-rocker mechanism

$$i = o \times \sin(\phi/2) \quad (5)$$

$$g = \sqrt{(i+z)^2 + o^2 - 2 \times (i+c) \times o \times \sin(\phi/2)} \quad (6)$$

여기서 i 를 날개 메카니즘에 적합한 임의의 길이로 설정해주면 자유변수는 c 만 남게 된다. 평면 4절 기구는 전진과 후진 동작에서 등속으로 움직이지 않으며, 등속에 가깝게 움직여야 두 크랭크 로커의 위상차를 22° 로 유지시킬 수 있기 때문에 c 의 길이를 정할 때 이를 고려하였다. 식 (5),(6)을 이용해서 출력각속도의 변화를 계산한 결과, c 대 i 의 비율이 증가함에 따라 크랭크 로커의 전진 및 후진 동작이 등속에 접근하게 된다. 그래서 i 와 c 의 비율은 1대20으로 설계하였다.

3.3.1 두 4절 기구의 동작 해석

Fig. 6은 입력 링크가 360° 회전할 때 두 로커의 위상차의 변화를 나타내는 그래프이다.

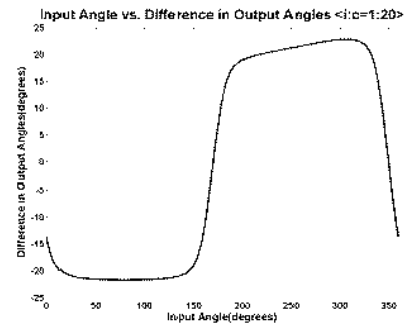


Fig. 6 Input angle vs. Difference in output angles

날개짓 구간에서는 로커의 위상차가 $20^\circ \sim 23^\circ$ 를 유지하며, 이는 날개의 받음각이 $43^\circ \sim 50^\circ$ 로 유지됨을 의미한다. 또한 날개회전은 입력각이 36° 회전하는 동안 진행된다. 이는 날개회전 지속시간이 최대 양력을 발생시키는 동작인 ΔT 는 0임을 의미한다. 제안된 4절 기구는 동시간 전후진 기구 이므로 τ_0 는 -0.05 이다.

3.5 날개 모양

날개의 모양은 실제 초파리와 같은 형상을 갖는 것을 원칙으로 하였다. 날개 모양을 결정짓는 인자 중 날개의 길이와 날개 단면의 평균 길이의 비율인 중형비 A_R 이 식(2)에 포함되기 때문에 이를 실제값과 일치시키는데 중점을 두었다. 날개의 크기는 전체 기구의 크기를 고려하여 5cm로 정하였다.

3.6 한 날개 메카니즘

한 쪽 날개 메카니즘은 Fig. 7과 같이 구성된다. 모터가 두 개의 4절 기구를 구동하고, 두 4절 기구는 5절 구면운동기구를 구동해서 날개가 동작하게 된다. 모터를 포함한 전체 메카니즘의 무게를 제작 가능한 10g으로 정하였다.

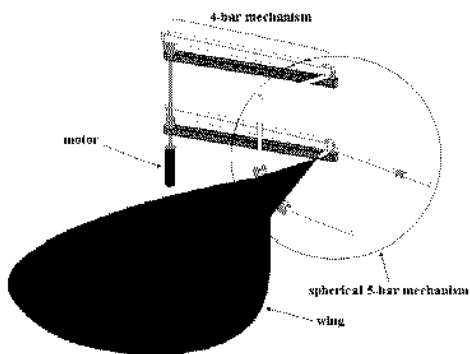


Fig. 7 Wing mechanism(double 4-bar mechanism + 5-bar spherical mechanism + wing)

3.6.1 날개 메카니즘의 동작

날개 메카니즘을 구동시켰을 때 받음각은 Table 1과 같이 변화하고, 이는 요구되는 45° 와 유사함을 알 수 있다.

Table 1 Angle of attack for the proposed mechanism

Input angle from motor	Wing angular displacement	Angle of attack
0°	0°	0°
36°	32°	50°
72°	64°	48°
108°	96°	46°
144°	128°	43°
180°	160°	0°
216°	128°	48°
252°	96°	46°
288°	64°	46°
324°	32°	48°
360°	0°	0°

최대양력을 발생시키는 동작과 제안된 메카니즘의 동작을 비교하면 Table 2와 같다.

Table 2 Comparison between maximum lift motion and motion of proposed mechanism

Parameter	Max. lift motion	Motion of proposed mechanism
Φ	180°	160°
α	45°	$43^\circ \sim 50^\circ$
τ_0	-0.05	-0.05
$\Delta\tau$	0.1	0.1
θ	0	0
$\overline{C_L}$	1.9	1.7

제안된 메카니즘의 양력계수는 Sane과 Dickinson⁽³⁾이 실험에 의해 얻은 값이다.

3.6.2 날개 메카니즘의 구동 속도

제안된 메카니즘의 동작에 의한 양력계수를 구하였고, 이를 이용하여 메카니즘의 무게인 10g을 공중 부양하는데 필요한 구동 속도를 계산할 수 있다. 식 (2)를 이용하면 $n=48\text{Hz}$ 가 계산되며, 이는 모터를 2880rpm으로 구동시키는 것과 같다.

4. 입력 토크

Fig. 7의 기구 구동 시 필요 토크는 날개가 받는 공기저항의 영향을 가장 많이 받으며, 다음과 같이 계산하였다. 모터의 일정한 속도가 4절 기구를 통해 구면 5절 기구를 거쳐 날개에 전달되며, 이 속도를 이용해 날개가 받는 항력을 계산해서 구면 5절 기구를 통해 4절 기구를 거쳐 최종적으로 모터에 전달되는 토크를 계산하였다.

4.1.1 날개의 각속도

일정한 속도(2880rpm)로 회전하는 모터가 4절 기구의 입력 링크를 회전시켜서 로커가 움직이게 되고, 로커에 의해 날개는 Fig. 8과 같은 각속도로 움직이게 된다.

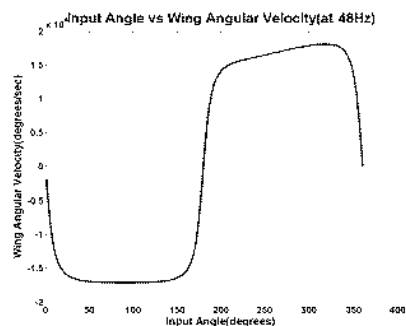


Fig. 8 Input angle vs. Wing angular velocity

4.1.2 공기저항에 의한 항력

날개에 발생하는 항력은 Fig. 8의 날개의 각속도를 수정된 항력공식(modified drag equation)(7)에 대입해서 계산하였다.

$$D = \frac{1}{2} \rho \overline{C_D} \int_0^R c U^2 dr \quad (7)$$

여기서 $\overline{C_D}$ 는 항력계수, c 는 날개 단면 길이, r 은 날개짓 축으로부터의 거리이며, c 와 U 는 r 에 따라 변한다. 계산된 항력의 합력의 위치는 $r=3.71\text{cm}$ 로 일정하고, 크기는 Fig. 9와 같은 변화를 보인다.

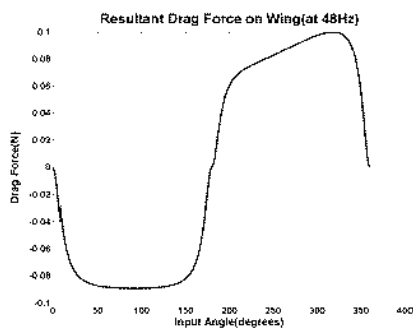


Fig. 9 Resultant drag force on wing

식(7)에서 항력은 속도의 제곱에 비례하기 때문에 항력의 변화는 로터의 속도 변화와 양상이 같지만 기울기가 더 가파르다는 것을 볼 수 있다.

4.1.3 모터 선정

날개가 받는 항력을 이용해서 구면 5절 기구의 입력 조인트들이 받는 토크를 계산하고, 이를 이용해서 기계적 확대율(mechanical advantage)에 의해 모터에 전달되는 토크를 계산하면 Fig. 10과 같다.

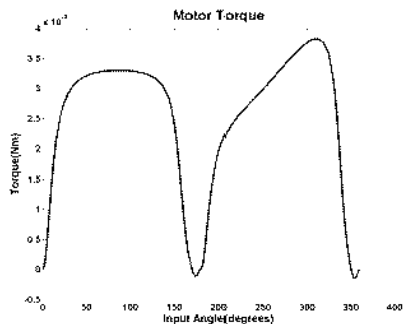


Fig. 10 Motor Torque

그러므로 항력에 의해 발생하는 최대 토크는 0.0038(Nm) 이다. 양쪽 날개를 고려하면 최대 토크는 0.0076(Nm) 이다. 모터를 제외한 나머지 기구부의 무게가 5g 이라고 정한다면, 각속도 2880(rpm) , 토크

7.6(mNm) , 무게 5g 의 상업용 모터를 선정하였다.

5. 결론

곤충의 비행은 현재까지 비행체에 적용해온 어떤 비행형태보다도 뛰어난 기동성을 제공해줄 수 있다. 본 논문에서는 곤충 비행에 관한 연구의 시초가 되는 곤충의 호버링 비행을 구현할 수 있는 메카니즘의 설계방법을 제안하였다. 구면 5절 기구와 두 개의 평면 4절 기구를 이용하여 메카니즘을 구성하였고, 요구되는 토크를 계산한 결과 상업용 모터로 전체 기구를 구동할 수 있음을 확인하였다. 결론적으로 단일 모터를 사용하여 무게가 가볍고 제어가 용이한 곤충의 호버링 비행을 구현할 수 있는 메카니즘의 설계방법을 제안하였다.

참고문헌

1. Michael H. Dickinson, Fritz-Olaf Lehmann, and Sanjay P. Sane, "Wing Rotation and the Aerodynamic Basis of Insect Flight," *SCIENCE*, Vol. 284, pp. 1954-1960, 1999.
2. R.S. Fearing, K.H. Chiang, M.H. Dickinson, D.L. Pick, M. Sitti, and J. Yan, "Wing Transmission for a Micromechanical Flying Insect," *IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, Vol. 2, pp. 1509-1516, 2000.
3. Sanjay P. Sane and Michael H. Dickinson, "The Control of Flight Force by a Flapping Wing : Lift and Drag Production," *J. Exp. Biol.*, Vol. 204, pp. 2607-2626, 2001.
4. S. Avadhanula, R.J. Wood, E. Steltz, J. Yan, and R.S. Fearing, "Lift Force Improvements for the Micromechanical Flying Insect," *IEEE Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 2, pp. 1350-1356, 2003.
5. C.P. Ellington, "The Novel Aerodynamics of Insect Flight: Applications to Micro-Air Vehicles," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 202, pp. 3439-3448, 1999.