

## Blimp형 4 Rotor Craft의 설계방법에 관한 연구

박윤수\* (KITECH), 이호길(KITECH), 김진영(KITECH), 원대희(KITECH), 박종현(한양대학교)

### A Study on Design Method and Control of Blimp-4 Rotor Craft

Y. S. Park (KITECH), H. G. Lee (KITECH), J.Y. Kim (KITECH), D.H. Won (KITECH),  
J.H. Park (Hanyang University)

#### ABSTRACT

In this paper, Fly robot with electric power, a kind of Unmanned aerial vehicle (UAV), is considered as an autonomous hovering platform, capable of vertical lift-off, landing and stationary hovering. This aircraft has four rotor and DC motors of electrical Power, which is capable of omni-direction for indoor application. In the earlier days of vertical flight experimentation developers looked at the intuitively easy control functionality of 4 rotor designs. But we need to obtain design method of suitable structures and adequate components because the existing prototypes of 4 rotor-craft don't analyze the propeller, motor characteristic and propose a methodology to optimize this system.

In this paper, we will show the new 4 rotor craft with blimp, analyze design and manufacturing method of 4 rotor craft system. Also we prove propriety of our design and manufacturing method by being based on thrust and motor experiment.

**Key Words :** UAV, VTOL(수직이착륙), Hovering, Blimp

#### 1. 서론

제한된 공간 내에서의 UAV는 헬리콥터의 기능과 부가적으로 수직이착륙, Hovering 비행과 민첩성, 제어성을 갖추어야 한다. 이러한 이유로 대부분의 것이 4개의 고정된 프로펠러를 가진 4 Rotor Craft이다. 4 Rotor Craft는 비행체를 조정하기 위해 Rotor의 속도를 조절하는 간단한 방식으로 되어 있지만, 매우 효과적인 제어 시스템을 가지고 있다. 우리는 본 논문에서 이러한 개념을 바탕으로 모델 크기의 Blimp형 4 Rotor Craft를 설계해보고자 한다. 이 비행체는 4개의 DC motor와 4개의 프로펠러로 구성되어 있으며, 기존의 헬리콥터보다 작은 크기이며, 실내 외 다양한 분야에서 적용 가능한 시스템이다. 4개의 입력추력으로 다양하게 rotor의 speed를 조정하여 제어하는 시스템이며, 고차의 couple된 Dynamics를 가지고 있고, 수직 이착륙 능력과 한 지점에서 정지 비행을 할 수 있다. 하지만 이러한 모델 크기의 UAV는 그 유효 탑재능력에 제한이 있고, 성능이 뛰어난 프로세서나 정확한 센서

시스템을 갖추기 어렵다.

이러한 이유로 본 논문에서는 Blimp를 이용하여 damping 효과와 복원 모멘트의 효과를 가미한 좀 더 안정된 시스템을 구축하려 시도하였다. 헬륨가스에 의한 Blimp는 어느 정도 유효탑재능력에 도움을 주고, 또 비행체의 정지 비행시시 숙련된 비행 조종능력 없이도 빠른 자세 안정화를 얻을 수 있다.

현재 여러 곳에서 4 Rotor Craft의 설계와 제어에 대한 연구가 진행되고 있지만[3][4][5], 우리가 쉽게 응용할 만한 설계방법은 정립되어 있지 않다. 더구나 내부에서 적용 가능한 DC motor를 추진체로 쓰는 Radio Control 타입의 비행체는 가볍고, 제어 성능이 우수하지만, 충격에 약하고 유효 적재량에 따라 매우 민감하며, 그 사용 시간이 제한적이라는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 간단한 공기역학을 통해 블레이드를 설계하고 이에 따라 모터를 선택하는 설계 방법을 설명하고 프레임 및 Blimp의 설계방법에 대해서도 명시하였다.

## 2. 4 Rotor Craft의 비행 원리

4 Rotor Craft는 4 자유도로 이루어진 전방향의 비행체로서 두 개의 프로펠러가 시계 방향과 시계 반대 방향으로 회전하면서 추력을 전달하게 된다. 이 비행체의 움직임은 상승/하강, 좌우 이동, 전후 이동 등의 motion을 얻을 수 있으며, Blimp형은 공기저항력과 복원모멘트가 포함되어진다. Figure 1은 Blimp 4 Rotor Craft의 비행원리를 자세히 설명해 주고 있다.[3][4]

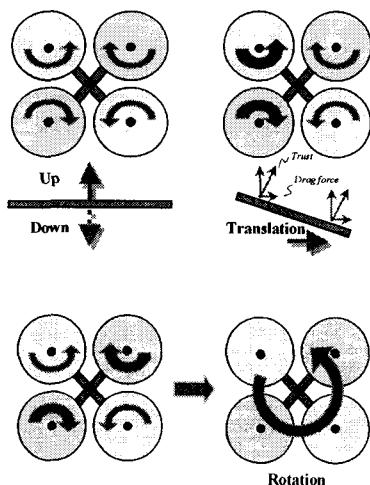


Fig.1 The Flying of Blimp 4 Rotor Craft

## 3. Blimp 4 Rotor Craft의 설계

### 3.1 블레이드 설계를 위한 Hovering 이론

Blimp 4 Rotor Craft는 Blade 위쪽의 공기를 빨아들여 아래쪽으로 내 보내면서 얻은 공기의 속도차로서 추력을 얻게 되는 헬리콥터의 hovering이론과 같은 원리로 비행하게 된다. Hovering 이론은 blade 설계 시 이론적인 소요 동력과 hovering시에 blade의 성능을 대략적으로 알 수 있다. 먼저, 베르누이 방정식[1]에 의해 공기가 유입될 시와 유출될 시의 변화를 살펴보면,

$$p_\infty = p_i + \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (1)$$

$$p_i + \Delta p + \frac{1}{2} \rho v_i^2 = p_\infty + \frac{1}{2} \rho v_\infty^2 \quad (2)$$

여기서,  $p_\infty$ ,  $v_\infty$ 는 프로펠러를 통과한 유체의 압력과 속도이고,  $p_i$ ,  $v_i$ 는 프로펠러를 통과하기 전 유체의 압력과 속도이다. 또  $\rho$ 는 공기의 밀도를 의미한다. 위의 (1), (2) 두 식으로부터, (3)식과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v_i^2 \quad (3)$$

운동량 보존 법칙에 의해 추력  $T$ 는 공기의 축방향 운동량의 증가분이므로,

$$T = \rho A v_i v_\infty \quad (4)$$

$$\Delta p = \frac{T}{A} = \rho v_i v_\infty \quad (4)$$

여기서,  $\rho A v_i$ 는 Mass flow이고, (3)식과 (4)식에 의해

$$v_\infty = 2 v_i \quad (5)$$

(5)식과 같이 유도 된다. 이 때 필요로 한 induce velocity와 induced Power를 구하여 보면 다음과 같다.

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (6)$$

이고, 동력이 외부의 손실 없이 모두 추력으로 변환된다고 가정 하면, 소요이론동력  $P_{Th}$ 는

$$P_{Th} = T \cdot v_i = T^{3/2} / \sqrt{2\rho A} \quad (7)$$

이고, 실제 동력은

$$P_r = P_{Th}/\eta \quad (8)$$

여기서,  $\eta$ 는 motor의 효율이다. (6)식과 (8)식을 이용하여 공기의 유입속도와 동력은 결정할 수 있지만, 블레이드를 제작하기 위한 형상 정보는 알 수가 없다. 블레이드의 형상 정보를 알기 위해서는 Blade-element theory 또는 vortex이론과 같은 원리를 적용하여야 한다. 하지만 여기에서는 위의 두 이론을 적용하지 않고도 대략적인 형상정보를 얻을 수 있는 방법을 소개한다.

먼저 프로펠러의 회전은 저압 터빈과 같은 회전을 하고 압력변화는 미소하며 풍향은 변화를 갖는다고 가정한다.

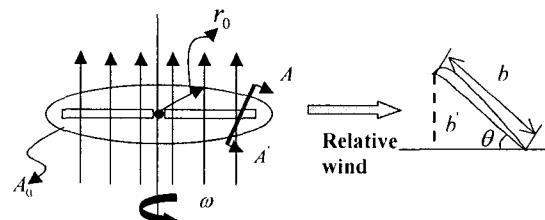


Fig.2 The airflow and a section of blade

여기에서  $r_0(m)$ 은 프로펠러의 반경,  $w(rad/s)$ 는 프로펠러의 각속도,  $\theta$ 는 pitch of angle,  $b$ 는 블레이드의 chord,  $n$ 은 프로펠러의 블레이드 갯수,  $A_0$ 는 회전에 의한 공기 입출구의 단면적이다.

단면적을 통과하는 공기의 유량은

$$Q = A v_i = \pi r_0^2 v_i \quad (9)$$

이다. 여기서 블레이드가 각속도  $w$ 로 회전할 때 1개의 블레이드가 밀어올린 유량  $Q'$ 는

$$Q' = \pi r_0^2 w \cdot b \sin \theta \quad (10)$$

이 때 블레이드의 개수가  $n$ 이라 하고, 이 때 블레이드를 통과하는 공기의 유량은 이상적으로 밀어낸 공기의 유량과 같다고 가정하면,

$$Q = \pi r_0^2 v = n \pi r_0^2 \sin \theta \quad (11)$$

(11)과 같은 식을 얻을 수 있다. 이 때의 induced velocity를 구하여 보면,

$$v_i = nw b \sin \theta \quad (12)$$

이고, (6)과 (12)에 의해, (13)과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\sqrt{\frac{mg}{2\rho A}} = nw b \sin \theta \quad (13)$$

### 3.1 Motor Selection

본 논문에서는 Blimp형 4 rotor craft의 프레임의 크기를 약 140 (mm)로 정하여 앞 절의 순서에 따라 블레이드의 반경, chord, 블레이드의 깊이, 추력을 고정 시킨 후 식 (6), (12), (13)에 의해 블레이드 당 공기의 유입 속도, power, RPM, Torque등의 사양을 얻을 수 있다.

<b>air induced velocity</b>	3.122 (m/s)
<b>Thrust</b>	37.5 (g)
<b>RPM</b>	25000 - 30000 (rpm)
<b>Blade number</b>	2
<b>Radius of propeller</b>	67.5(mm)
<b>Power</b>	4 - 6 (W)
<b>Torque</b>	40 - 50 (g.cm)

표 1. Blimp형 4 Rotor craft에 사용된 Motor의 사양

### 3.2 프로펠러 설계

프로펠러의 설계는 공기역학적인 문제나 기계적인 문제 모두를 고려하여야 하기 때문에 그 정확한 형상의 선택은 쉽지 않다. 본 논문에서는 간단한 상사법칙과 앞 절의 여러 파라미터를 고려하여 블레이드를 설계하였다. 우선 블레이드를 간단하게 단순 모델을 다음의 상사법칙을 이용하여 블레이드의 형상을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} Thrust & T \propto S v^2 \propto L^2 (NL)^2 \propto N^2 L^4 \\ Torque & M \propto S r^2 L \propto N^2 L^5 \\ Power & P \propto S r^2 L N \propto N^3 L^5 \\ Reynolds Number & Re \propto v L \propto NL^2 \end{aligned} \quad (14)$$

여기에서,  $N$ 은 프로펠러의 회전수이며,  $L$ 은 프로펠러 중심에서 회전축까지의 거리이다.

또 Pitch각은 블레이드가 회전할 때 공기의 유입 속도와 회전 속도에 의존하기 때문에 그 이론적인 형상 또한 쉽게 알 수가 있다. 식 (13)과 상사 법칙에 의하여 다음과 같은 블레이드 형상을 얻었다.

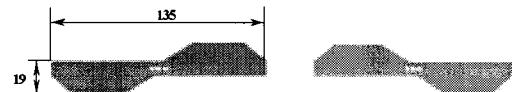


Fig.3 CW 와 CCW 프로펠러의 형상

프로펠러의 재료로서는 포맥스, PVC, Balsa, Carbon 등이 RC 비행체의 재료로 사용되어지고 있다. 포맥스는 가공이 쉽고, 가격도 싸지만 다른 재료에 비해 무게가 무겁기 때문에 소형 비행체에는 부적합하며. Carbon은 그 성능이 다른 재료에 비해 우수하지만 가격이 고가인 것이 단점이다. 또 Balsa는 성형성이 우수하고 가격도 저렴하지만 강도가 약하다. 본 논문에서 사용한 재질인 PVC는 여러 대비 면에서 다른 프로펠러보다 가공성 및 가격, 강도가 적당하다. 위의 블레이드 형상을 바탕으로 가장 최적의 블레이드 얻기 위해 피치각 변화 실험을 수행하였다.

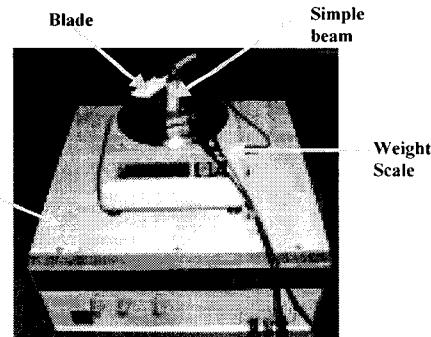


Fig.4 Propeller Test Experimental Setup

이 실험장치는 전자저울과 프로펠러의 추력을 전달하여 주는 단순보로 이루어져 있다. RPM은 광 타코미터에 의해 측정되며, 파워 서플라이에서 공급된 전압을 상승시켜 그 때의 전압, 전류, 추력, RPM, 토크 등을 측정하였다. 일반 RC 헬리콥터의 피치각은 8°-10°이지만, 프로펠러 재질에 따른 변형을 알 수 없기 때문에 10°이상의 피치각을 주어 실험하였다. Figure 4,5,6에 의한 실험 결과를 보면 피치각 20°일 때 비교적으로 추력과 Power가 효율적임을 알 수 있다.

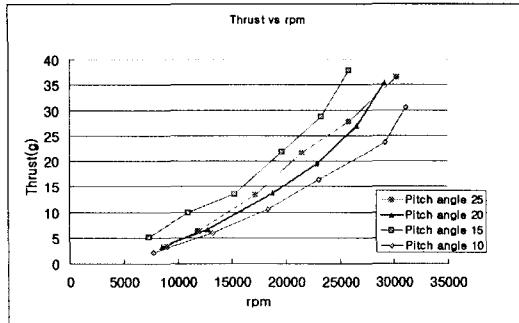


Fig.5 Thrust vs RPM

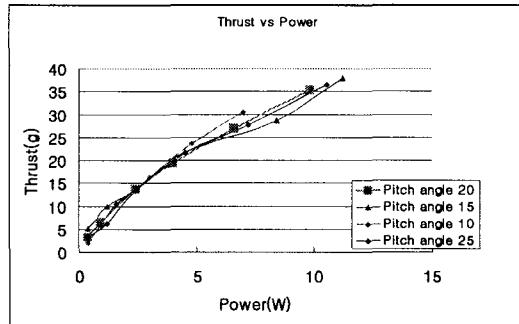


Fig.6 Thrust vs Power

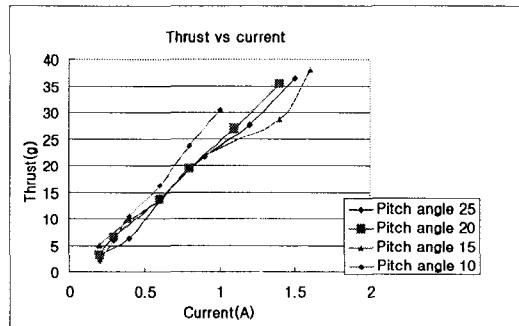


Fig.7 Thrust vs Current

실험 결과에 의한 프로펠러의 사양을 정리하여 보면 다음과 같다.

Parameter	Experimental Setup
Length	135(mm)
Chord	19(mm)
Pitch angle	20( $^{\circ}$ )
Maximum Thrust	approximately 40(g)
Weight	1.4(g)

표 2. 프로펠러의 사양

### 3.3 Blimp Design

Blimp는 Blimp형 4 rotor craft의 무게를 줄이거나 자세의 안정화에 도움을 준다. 다시 말해서 Blimp형 4 rotor craft가 비행시에 불안정한 상태에 있을 경우 blimp의 부심과 무게중심의 관계에 의해 복원 모멘트가 작용하게 되어 안정된 상태를 이루게 된다. Blimp를 구라 가정하였을 때 아르키미데스의 원리로부터 부력과 Blimp 부피와의 관계는 다음과 같이 도출되어 진다.

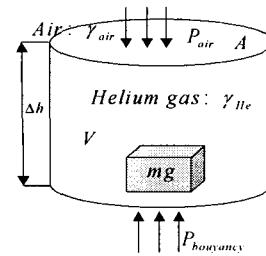


Fig.8 Blimp와 부력과의 관계

$$V = \frac{mg}{\rho_{air}g - \rho_{He}g} = \frac{mg}{(1 - s_{He})\rho_{air}g} \quad (15)$$

$$r = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{3mg}{4\pi(1 - s_{He})\gamma_{air}}} \quad (16)$$

여기서,  $\rho_{air}$ 와  $\rho_{He}$ 은 공기와 헬륨의 밀도,  $m$ 은 비행체의 질량,  $s_{He}$ 는 헬륨의 비중,  $\gamma_{air}$ 는 공기의 비중량을 나타내며, Blimp의 반경에 따른 부력은 다음과 같이 나타내어진다.

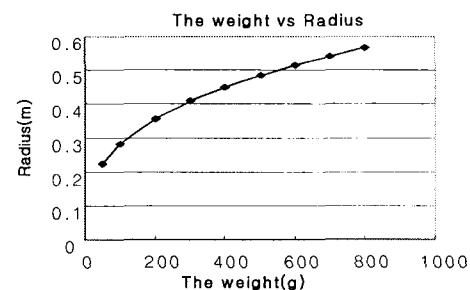


Fig.9 무게와 Blimp 반경과의 관계

### 3.4 Frame

Blimp형 4 rotor craft의 프레임의 재료는 떨어지는 충격에 강해야 하고, 충분히 가벼워야 한다. 일반적으로 프레임의 재료로서 Balsa, Pine, 알루미늄, Carbon fiber pipe 등이 사용되어진다. 우리는 Blimp형 4 rotor craft의 재료로서 어느 정도 가볍고 강도를 가지고 있는 Carbon pipe를 사용하였다.

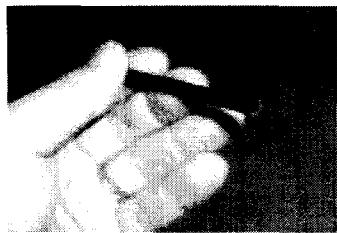


Fig.10 Carbon Pipe Frame

### 3.4 Blimp형 4 rotor craft Design

앞 절의 프로펠러 설계와 모터 설계를 기초로 하여 다음과 같은 사양의 Blimp형 4 rotor craft를 제작하였다.

전체 무게	130 (g)
제대주리	160(g)
높이	60(mm)
폭	220(mm)
Controller	PIC16F876
Sensor	Murata Rate Gyro

표 3. Blimp형 4 rotor craft의 사양

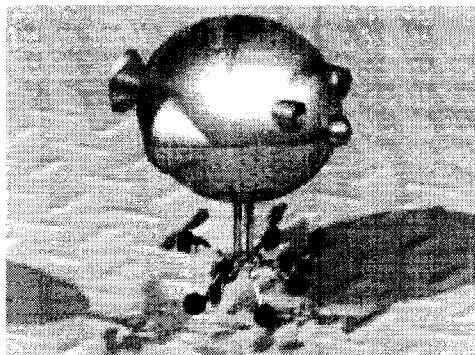


Fig.11 Blimp형 4 rotor craft의 3D Model

## 4. 결론

본 논문에서는 Blimp형 4 rotor craft의 주요 설계 요소인 프로펠러, 모터, 프레임, Blimp등의 설계 방법 및 최적화 방법에 대한 연구를 수행하여 기존의 Blimp형 4 rotor craft 설계 방법을 최적화하고자 하였다. 특히, Hovering 이론과 상사 법칙에 의하여 개략적인 Blimp형 4 rotor용 프로펠러를 설계하여, 이에

의해 이론적으로 설계된 프로펠러를 피치각의 변화 실험을 통하여 높은 효율을 갖는 블레이드를 설계하여 복잡한 공력 해석을 하지 않고도 효율이 높은 프로펠러를 설계하였다. 또한 위의 이론에 의하여 블레이드의 특성과 맞는 모터를 선택하였고, 이 모든 설계 요소들을 통합하여 Blimp형 4 rotor craft 제작, 설계 방법의 효율성을 검증하였다. 향후 제어기 부분이나 센서부의 설계법 구축과 미진한 요소의 설계법에 대한 보완이 이루어진다면 초소형 비행로봇과 같은 설계법 구축에 기여하리라 사료된다.

## 참고문헌

- [1] ROTARY-WING AERODYNAMICS C.N.Keys , W.Z.Stepniewski, , Dover Publications, 1984.
- [2] Yunsoo Park, Hogil Lee, JinYoung Kim, Daehee Won, "Dynamic Analysis and Control for an UAV of DC Motor Type", 2002, ICCAS.
- [3] Masami Saeki, Jun-ichi Imura, Yasunori Wada, "Flight control design and experiment of a twin rotor helicopter model via 2 step exact linearization", Proc. IEEE Int. Conf. On control Application,1999, pp146-151.
- [4] V. Mistler, A. Benallegue and N,K M'Sirdi, "Exact linearization and noninteracting control of a 4 rotors helicopter via dynamics feedback, IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication, 2001, pp586-593.
- [5] Erdinc Altug, James P. Ostrowski, Robert Mahony, "Control of a Quadrotor Helicopter Using Visual Feedback, The 2002 IEEE, ICRA, pp 72 ~ 77.
- [6] Development of the Black Widow Micro Air Vehicle, Joel M. Grasmeyer and Matthew T. Keenon, AIAA-2001
- [7] GTMARS, American Helicopter Society Student Design Competition, Georgia Tech, 2000.
- [8] Toward Indoor Flying Robot, Jean-D.Nicoud, Jean-C. Zufferey, Preceeding of the 2002 IEEE/RSJ In 시. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, Lausanne, Switzerland, 10, 2002.
- [9] The Mesicopter: A Miniature Rotorcraft Concept, Ilan Kroo, Fritz Prinz, Michael Shantz, Stanford University, July 2000.
- [10] 이호길, 원태희 외 “전방향 소형 비행체의 개발” 한국정밀공학회, 춘계학술대회, 2003