

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(5), 431-438(2016)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.5.431

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

자가발전형 쿼드콥터 설계 및 제작

이운성, 김윤수*

Design and manufacture of a self-powered quadcopter

Yun Seong Lee and Yoonsoo Kim*

Department of Aerospace and Software Engineering,
Research Center for Aerospace Parts Technology, Gyeongsang National University

ABSTRACT

In this paper, a self-powered quadcopter is designed and manufactured. The quadcopter gains extra power via two types of generators which utilize the principle of electromagnetic induction. One of the types is to make use of a commercial BLDC motor which rotates together with a propeller and thus acts as a generator. The other type is to make use of a coil-wound ring around a propeller which generates electricity when small magnets embedded in a uniquely designed frame rotate together with the propeller. The proposed generators are expected to be of practical use when they are located under the propellers of a quadcopter.

초 록

본 논문은 자가발전형 쿼드콥터를 설계하고 제작한 내용을 다룬다. 본 논문에서 제안하는 자가발전형 쿼드콥터는 전자기유도원리를 이용해 설계된 두 가지 발전장치를 통해 추가 전력을 얻는다. 첫 번째 발전장치는 상용 BLDC모터와 프로펠러를 결합해 함께 회전시켜, BLDC모터를 발전기처럼 활용해 전력을 생산하는 장치이다. 두 번째 발전장치는 프로펠러의 회전축에 작은 자석들을 포함한 프레임을 결합해 함께 회전시켜 코일이 감긴 보호링에서 전력을 생산하는 장치이다. 본 발전장치들은 상용 쿼드콥터 프로펠러 하단에 장착되어 실용적인 발전을 할 수 있으리라 기대된다.

Key Words : Self-powered Quadcopter(자가발전형 쿼드콥터), Electromagnetic induction (전자기유도)

1. 서 론

쿼드콥터는 민첩한 기동성을 가지며 전기배터리를 이용해 추진하는 무인항공기이다. 최근 쿼드콥터가 주목받는 것은 제어가 비교적 쉽고 다

양한 분야에 활용 가치가 높기 때문이다. 특히 쿼드콥터는 크기가 작아 휴대가 간편하고, 어디서나 필요할 때 조립해 날릴 수 있어 유용하다. 최근에는 쿼드콥터가 다양한 IT기술과 융합하면서 스마트폰으로 조종하고 실시간으로 영상데이

† Received : November 18, 2015 Revised : March 26, 2016 Accepted : April 28, 2016

* Corresponding author, E-mail : yoonsoo@gnu.ac.kr

터 송수신도 가능하게 되는 등 점차 활용 분야가 넓어지는 추세이다[1],[2],[3]. 소형 쿼드콥터는 빠른 운동성과 작은 크기로 인해, 실내와 야외 어디서나 비행할 수 있다. IT 분야에서는 쿼드콥터를 공간의 제약을 뛰어넘는 최고의 제작품으로 평가하고 있다. 쿼드콥터는 다수의 프로펠러가 장착되어 있어 순간적인 기동성이 좋고, 고속 고성능 BLDC모터를 장착한 쿼드콥터의 경우 기존 헬리콥터보다 훨씬 빠른 속도로 안정적인 이동이 가능하여 운반수단의 혁신을 가져올 수 있다 [4],[5]. 최근 쿼드콥터를 쉽게 제어할 수 있는 기술들이 많이 소개되고 있어, 한때는 전문가들만 조작하고 다룰 수 있던 쿼드콥터가 이제는 일반 대중들도 쉽게 스마트폰 등으로 조작할 수 있는 대상이 되었다. 정찰 등 군사적 목적에 국한되었던 쿼드콥터가 개인용, 상업용, 연구용 등으로 보편화되면서 그 활용분야 역시 매우 다양해지고 있다. 쿼드콥터 기술을 활용한 소형 무인기 시장은 앞으로 차세대 교통시스템과 개인용 항공기(Personal Air Vehicle) 분야로까지 발전할 전망이다. 이에, 최근 많은 연구소와 회사에서 주목받고 있다[6].

쿼드콥터는 배터리에 저장된 전기에너지를 사용해 모터를 회전하여 날 수 있는 기계적 장치이다. 쿼드콥터는 상기 언급한 순간 기동성 등 여러 긍정적인 특성으로 인해, 타 기계적 장치들에 비해 비교적 많은 전력소모를 요한다. 예를 들어 1kg의 쿼드콥터가 중력을 이기고 날기 위해서는 각각의 프로펠러 회전속도가 약 3000RPM (Revolution Per Minute) 이상이 되어야 하며, 이는 통상적인 리튬-이온 3셀 배터리 1개로 약 15분미만의 짧은 비행시간을 의미한다. 따라서 현재의 배터리 기술로서는 쿼드콥터를 활용해 긴 임무를 수행하는데 큰 제한이 있음을 알 수 있다. 이러한 제한을 극복하기 위해서는 배터리에 저장된 전기에너지의 효율적인 관리가 필수적이다.

무인항공기에 에너지를 재충전하는 방안들은 여러 각도로 많은 연구가 되어 왔다. 무인항공기 자체시스템으로부터 발생하는 빛, 열, 운동에너지 등을 재활용하거나 혹은 외부환경(물, 바람, 태양)을 통해 에너지를 공급받아 요구되는 임무수행시간동안 배터리를 충전해 활용하는 것이 가능하다[7]. 특히, [8]은 소형 무인항공기에 태양전지를 부착하여 12시간 이상 연속비행이 가능함을 보였다. [9]에서도 태양에너지를 활용해 20~30%의 추가전력을 확보하는 사례를 보고하고 있다. [10]에서는 무인항공기 내부에서 발생하는 열을

분산시켜 7% 추가 전력을 확보하고 이로 인해 항공기의 비행시간을 20분 정도 증가시킨 사례를 보여준다. 무인항공기 비행시간 연장을 위해 연료전지를 활용한 연구도 진행되고 있다. 특히, Protonex Technology Corporation[11]은 휴대용 원격 및 모바일을 위한 연료 전지 개발 업체로서, 기존의 배터리 기술을 능가한 훨씬 많은 용량의 최적화된 연료 전지인 PEM(Proton Exchange Membrane) 연료 전지 시스템을 개발하고 있다. 이 PEM 시스템으로 기존 연료전지 대비 5%의 효율을 높일 수 있는 것으로 확인되었다[12]. 수소 전지를 활용한 배터리 충전 연구도 보고되었다. 실제로 수소 전지를 통해 기존에 20분 비행 가능한 무인항공기를 120분 비행 가능하게 할 수 있는 것으로 확인되었다[13]. 그 밖에, 발전기 컨트롤러를 개발하여 엔진의 작동과 정지를 자동제어하여 불필요한 출력(최대 40~80A)을 방지한 예가 있다[9].

본 논문에서는 쿼드콥터 모터들의 회전에너지를 전기에너지로 변환하여 추가 전력을 확보하는 방법을 고려해본다. 회전에너지를 전기에너지로 변환해 추가동력을 얻는 예로 전기자전거 및 전기자동차가 있다. 전기자전거는 인력으로 구동되는 자전거에 모터와 배터리를 추가하여 보조동력원 또는 주 동력원으로 사용하는 운송수단이다. 전기자전거는 인력과 전동력이 함께 작용하는 하이브리드 구동시스템이며, 전기자동차와 달리 전기자전거는 인력을 함께 사용하기 때문에 작은 용량의 배터리를 사용하여도 무방하다. 이렇게 충전된 배터리는 핸드폰 및 MP3 충전이나 인버터와 연결해서 교류로 변환 후 전자제품을 구동하는데도 사용가능하다[14],[15],[16]. 전기자동차는 주행 중 모터만을 사용하므로 전기모터와 엔진을 병행 사용하는 하이브리드 자동차와 구분되며, 기존 내연기관 자동차나 하이브리드 자동차에 비해 단순한 구조를 갖고 있다. 우리나라는 전기자동차의 핵심인 리튬이차전지에 관한 기술 강국으로서 다수의 전기자동차 개발 프로젝트에 참여하여 기술을 인정받고 있다[17].

전기자전거 및 전기자동차 배터리 충전의 핵심은 발전기 설계이다. 발전기, 특히 전자기유도식 발전기 설계는 매우 오래된 분야이며 수많은 논문과 특허기술들이 쏟아져 나왔다. 그 중, [18]은 소형 발전기의 최근 기술동향을 분석하여 보여준다. 고효율/고출력 전자회로 설계, 소형경량화 설계, 부하대응 출력전압제어 메커니즘에 맞는 신뢰성 확보를 위한 연구가 활발히 진행되고 있음을 알 수 있다. 특히 일본은 3000W이하

의 제품에서 인버터 모델을 개발하여 부피와 무게를 1/2로 저감시키고 우수한 출력을 낼 수 있는 제품을 개발하였다. 전자기유도식 발전기가 무인항공기에 적용된 사례도 찾을 수 있는데, 특히 [19]는 고정익 무인항공기 앞단에 설치된 프로펠러의 회전축에 회전자(영구자석)와 고정자(철에 권선이 감긴 형태)를 구성해 무인항공기에 추가 전력을 공급할 수 있는 4.5kW급 발전기를 설계하였다. 하지만 상기 언급한대로 소형 쿼드콥터에 전자기 유도방식 발전을 적용하여 실험을 통해 검증한 사례는 알려진 바 없다. 따라서 본 논문에서는 고전적인 전자기유도원리를 이용해 쿼드콥터가 방출하는 운동에너지를 전기에너지로 바꾸는 두 가지 방안을 시도해 그 효용성을 검토해보고자 한다.

II. 본 론

쿼드콥터가 방출하는 운동에너지는 대부분 프로펠러의 회전에서 기인한다. 따라서 전자기유도원리를 이용한 발전을 위해 프로펠러의 운동에너지를 전기에너지로 변환하는 장치를 구성한다. 이를 위해, 본 논문에서는 먼저 아래와 같이 프로펠러 회전축 주변에 두 가지 발전장치를 구성하고 그 발전효율을 실험을 통해 검증해보고자 한다.

- 발전장치 1 : 프로펠러와 발전기 축결합을 통한 발전

첫 번째 발전장치는, 쿼드콥터 프로펠러를 구동하는 모터의 회전축에 또 다른 (BLDC)모터를 결합해 함께 회전시켜, BLDC모터가 회전 시 발생하는 전력을 통해 효율을 측정한다. 여기서 프로펠러와 함께 회전하는 BLDC모터는 내부에 고정자와 회전자를 포함하고 있으므로 발전기로서의 역할을 하게 된다. 이렇게 발전기에서 생산된 전력은 배터리에 충전되어 쿼드콥터 비행시간 연장에 기여할 수 있다(Fig. 1 참조).

- 발전장치 2 : 프로펠러 보호링을 활용한 발전

쿼드콥터 프로펠러 주변에 보호링을 도입해 추락 시 프로펠러를 보호하고 쿼드콥터의 공기역학적 특성을 좋게 할 수 있다. 본 논문에서는 [20]에서 제안한 개념과 유사하게, 쿼드콥터의 보호링에 코일을 감고 프로펠러의 회전축에 자석을 달아 함께 회전시켜 유도기전력을 생성해 발전하는 이른바 ‘자가발전형 쿼드콥터’ 시스템을 구현해보고자 한다. 생성된 유도기전력(교류)은 직류로 변환된 후 배터리에 공급된다. Fig. 2는 [20]에서 제안한 보호링을 이용한 발전개념을 보여주

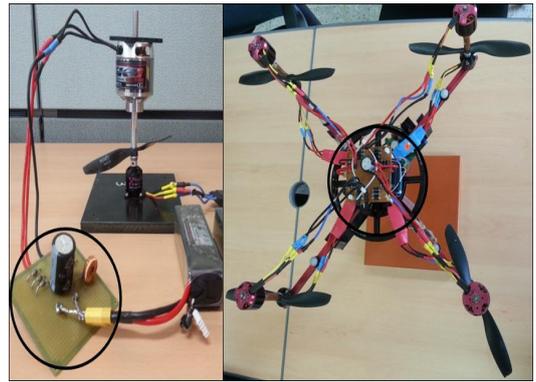


Fig. 1. Electric generator using a BLDC motor being coupled with the quadcopter propeller's rotation axis

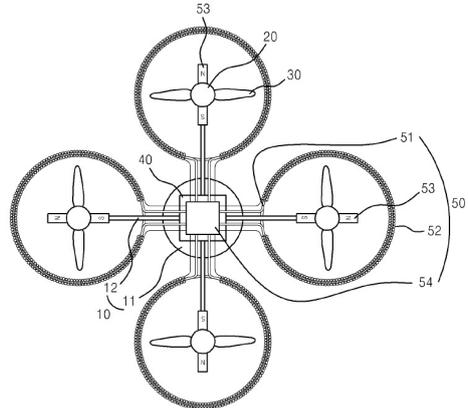


Fig. 2. Conceptual diagram of electric generator using the quadcopter's protection ring [20]

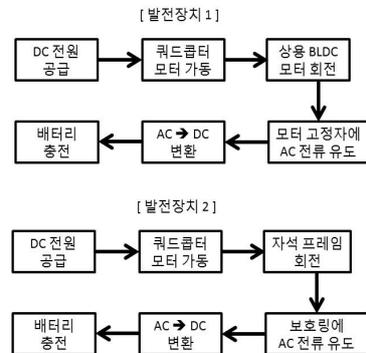


Fig. 3. Block diagrams summarizing the proposed concepts for testing two generators

고 있다.

Figure 3은 두 가지 발전장치의 개념을 요약해서 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 발전장치는 발전을 위해 상용모터와 코일이 감긴 보호링을 활용한다. (AC/DC 변환 및 배터리 충전회로 등은 두 발전장치 모두 동일하다.) 상용모터는 모터 내부의 제한된 공간에 자석과 코일이 이미 최적으로 배열된 구조라는 점에서 유의미한 발전효율이 예상되어 발전장치로 고려되었다. 반면 보호링은 그 구성에 있어 상용모터에 비해 최적은 아니지만, 보다 넓은 영역에 강력한 전자기장 형성이 가능하므로 유의미한 발전효율을 기대할 수 있다.

2.1 모터와 발전기 축결합을 통한 발전

2.1.1 3상 AC-to-DC 변환회로 설계

이미 서두에 언급했듯이 일반 DC모터에 비해 효율이 좋은 상용 BLDC모터를 발전기처럼 사용해 발전을 하는 것이 가능하다. Fig. 1에서와 같이 프로펠러를 회전시키는 모터에 쓰이는 전력으로 다른 모터(발전기)를 함께 회전시켜 전력을 생산하는 개념을 고려한다. BLDC모터를 이용한 발전은 모터 내벽(회전자)을 프로펠러와 함께 회전시켜, 중심의 고정자에 전류를 유도함으로 가능하다.

BLDC모터는 3상 교류(AC)신호를 출력하므로 배터리 충전을 위해서는 DC신호로 바꾸는 회로를 구성해야 한다. 배터리(리튬-이온 3셀)는 항상 11.1V의 일정한 전압을 요구하므로 전압을 일정하게 하는 회로 또한 필요하다. 이를 위해, Fig. 4와 같이 발전기에서 나오는 3상 AC전압을 DC로 변환하는 회로를 구성한 후 콘덴서를 추가해 정전압을 유지한다(Fig. 1 왼쪽의 원형으로 표시된 부분).

Figure 1의 오른쪽은 쿼드콥터 각각의 발전기에서 생성된 전력을 직렬로 연결해 합친 후의 모습을 보여준다. 쿼드콥터의 프로펠러들은 요잉모멘트(Yawing Moment)의 상쇄를 위해 한 쌍은 시계방향, 다른 한 쌍은 반시계방향으로 회전하므로 이를 고려하여 생성되는 전력을 합쳐야 한

다. (4개의 발전기에서 나오는 12개 선 각각의 전류 흐름을 주의 깊게 관찰하여 회로를 구성해야 한다.) 서두에서 이미 언급했듯이, 합쳐진 신호의 전압은 배터리에 공급되기 전 11.1V를 유지해야 한다.

2.1.2 실험 결과

제작된 발전장치가 생산하는 전력을 측정하기 위해 모터의 회전속도를 5000RPM으로 정하고, 발전장치에서 나오는 전력을 배터리에 저장하였다. 5000RPM은 쿼드콥터가 급 기동 시에 사용되는 회전속도이다. 실험 결과, 발전장치 없이 정해진 회전속도로 일정하게 1개의 모터를 회전시킬 때 $6.03W(=14.1V \times 0.428A)$ 의 전력이 소비되는 것을 확인하였다. 발전장치를 장착했을 때는 발전장치가 소모하는 추가 전력소비로 총 $14.2W(=14.1V \times 1.01A)$ 의 전력이 소모되었으며, 발전장치가 생산한 전력은 $7.28W(=13.4V \times 0.543A)$ 였다. 따라서 본 발전장치 자체의 효율은 $89.1%(=7.28/(14.2-6.03))$ 로 계산될 수 있다.

이미 내부구성이 최적화된 상용 모터를 사용한 발전기 효율은 89.1%로 매우 높은 것으로 나타났다. 따라서 상용 쿼드콥터 프로펠러(A)의 하단에 또 다른 프로펠러(B)와 BLDC모터로 구성된 발전기를 장착하여, 프로펠러(A)의 후류가 프로펠러(B)를 동작시키는 방식으로 유의미한 발전을 기대할 수 있다. 이론적으로 쿼드콥터가 프로펠러(B)를 5000RPM으로 동작시키면서 비행을 한다면, 상기 발전장치의 효율로부터 (발전장치를 장착하지 않은 경우 대비) 비행시간을 189% 증가시키는 효과를 기대할 수 있다. 하지만 본 발전기가 실용적인 의미를 갖기 위해서는 모터의 무게와 크기가 대폭 감소되어야 할 것으로 보인다. 특히 모터의 크기는 프로펠러(A)를 통과하는 흐름에 직접적으로 영향을 미치므로, 고효율을 유지하면서 모터를 얼마만큼 작게 할 수 있느냐가 중요한 변수가 된다.

2.2 프로펠러 보호링을 활용한 발전

2.2.1 보호링 설계

쿼드콥터는 프로펠러 보호 등 여러 안전상의 이유로 최근 쿼드콥터의 프로펠러 주변에 보호링이 도입되는 추세다. 본 논문에서는 보호링에 코일을 감고 프로펠러의 회전축에 자석을 부착하여 전자기유도효과에 의한 전력회수방안을 생각해본다. Fig. 5는 중앙모터의 회전축에 달린 막대자석(양끝이 N극과 S극으로 자화됨)과 코일이 감긴 보호링을 포함한 간단한 실험장치를 보여준다. 자석이 특정한 곳에 위치할 때 자석과 근접한 코

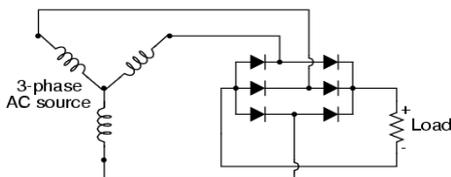


Fig. 4. Three-phase bridge rectifier [21]



Fig. 5. Experimental setup for the concept of electric generation using the quadcopter's protection ring

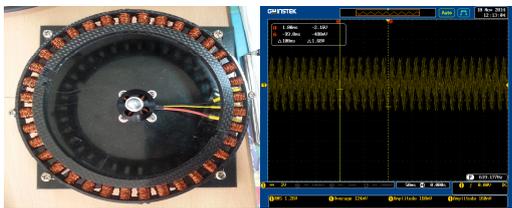


Fig. 6. Experimental result using the coil-wound ring with no consideration of phase difference in induced current

일에는 자석의 움직임을 방해하는 자기장이 발생하며 그 자기장에 의해 전류가 코일에 유도된다. 다만 자석이 회전함에 따라 각각의 폴(pole)에 감긴 코일에 유도되는 전류가 다른 위상을 갖게 되므로, 전류의 위상차를 고려하지 않고 코일에 유도된 전류를 모아 전력을 측정하면 작은 전구 정도만을 동작시킬 수 있는 미비한 값이 얻어진다.

Figure 6은 Fig. 5와 같은 보호링에 보다 많은 폴을 추가하고 보호링의 재료를 가벼운 탄소섬유로 바꾼 후 수행한 실험결과를 보여준다. 코일의 감은 수의 증가로 회수전력의 양은 증가하였지만, 폴에 감긴 코일에 유도된 전류의 위상차를 고려하지 않고 감았을 때 Fig. 6의 오른쪽에서 보듯이 유용한 파형이 얻지 못함을 알 수 있다. Fig. 7의 상단은 전류의 위상차를 고려해 3상으로 코일을 감는 방법을 나타내며, 이렇게 감긴 코일에 유도된 전류신호를 적절히 조합하면 Fig. 7의 하단과 같은 보다 유용한 파형을 얻을 수가 있다. 이와 같이 여러 개의 상(phase)을 이용해 Fig. 7의 보호링에 감긴 코일의 감는 방법을 이용하여 전류를 유도하여 조합할 수 있겠지만, 본 연구에서는 여러 개의 자석을 이용한 독창적인 설계방식(2.2.2절에서 설명)으로 코일에 전류를 유도하였다.

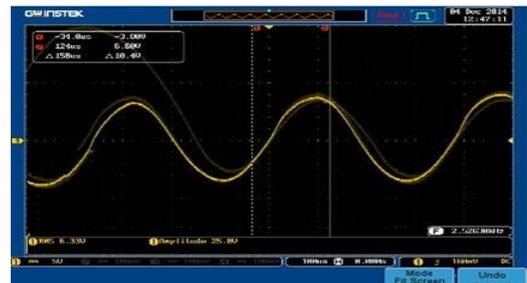
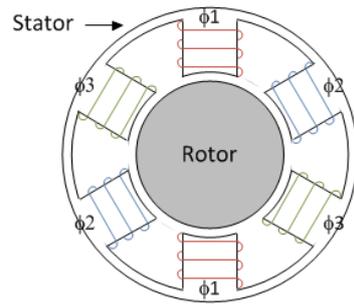


Fig. 7. Experimental results of electric generation with the consideration of phase difference (three-phase) in induced current

2.2.2 자석프레임 설계

Figure 8은 전력 생산을 극대화하기 위해 프로펠러와 함께 회전하는 기존의 막대자석 개념을 탈피하여 제작한 자석프레임을 보여준다. 자석프레임은 기본적으로 가볍고 휘어지지 않는 알루미늄 소재로 제작했으며 프레임의 외형에 보호링 폴과 동일한 수의 작은 네오디움 자석을 채워 넣었다. 보호링 폴과 마주하는 자석들의 극성은 N극과 S극이 교대로 변한다. 이를테면, 1번 폴과 마주하는 자석의 표면극성이 N극이라면, 이웃하는 2번 폴과 마주하는 자석의 표면 극성은 S이다. 폴과 자석의 개수를 동일하게 한 독창적인 프레임 디자인으로 인해, 자석프레임 회전 시 홀수 번째 폴들에 감긴 코일에는 모두 동일한 상



Fig. 8. Frame with magnets as many as the number of poles in the ring

의 전류가 유도되며, 마찬가지로 짝수 번째 폴들에 감긴 코일에도 모두 동일한 상(홀수 번째 폴들에 감긴 코일에 유도되는 전류와 180도 위상차)의 전류가 유도된다.

Figure 9는 유도전류의 세기를 증대시키기 위해 강철을 삽입한 보호링의 제작과정이다. 코일에 유도되는 전력의 양을 높이기 위해, 코일이 감긴 보호링 각각의 폴 내부에 불에 달군 실린더형 작은 강철(steel)을 삽입하였다. Fig. 9는 강철이 삽입된 폴의 무게에 따른 세 종류의 보호링을 보여준다. 예를 들어, 16개의 폴을 가진 보호링(맨 좌측 보호링)은 다른 보호링들에 비해 코일의 감은 수는 많으나 삽입된 강철의 양이 적다. 폴의 감은 수보다 삽입된 강철의 양이 보호링 무게에 더 큰 영향을 줄을 알 수 있다. 실험을 통해 코일의 감은 수보다는 삽입된 강철의 양이 많을수록 더 높은 발전효과를 가짐을 확인하였다. 그러나 무거운 보호링은 향후 쿼드콥터의 페이로드(payload)에 큰 영향을 미치므로 24개가 아닌 20개의 폴을 가진 보호링으로 실험을 진행하였다.

2.2.3 실험 결과

보호링에 감긴 코일에 유도되는 전력을 측정하기 위해 모터의 회전속도를 3100RPM으로 정하고, 발전장치에서 나오는 전력을 직류로 변환해 쿼드콥터용 리튬-이온 배터리에 저장하였다. 3000RPM은 쿼드콥터가 중력을 이기고 수직으로 이륙을 가능하게 하는 회전속도이다. 첫 번째 발전장치 실험에서와 같이 두 번째 발전장치 전력 측정도 5000RPM의 회전속도로 하는 것이 효율 비교 등을 위해 적합하지만, 보호링 발전장치에 삽입된 자석이탈 등 몇 가지 기술적/안전상의 문제로 낮은 회전속도로 실험을 수행하였다. 통상적으로 저속보다는 고속회전에서 발전장치의 효율이 높게 나타나므로, 본 논문의 실험결과는 매우 보수적이며 실제 상황에서는 보다 높은 효율을 기대할 수 있다. 실제로, Fig. 10은 Fig. 8의 자석프레임에 90도 간격으로 4개의 자석을 넣고 다른 회전속도로 발전했을 때의 전력 효율을 나타내며, 그림에서 볼 수 있듯이 전력 효율이 저속에서보다 고속에서 매우 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

실험 결과, 발전장치 없이 정해진 3100RPM의 회전속도로 일정하게 1개의 모터를 회전시킬 때 1.84W(=11.5V×0.16A)의 전력이 소비되는 것을 확인하였다. 발전장치를 장착했을 때는 발전장치가 소모하는 추가 전력소모로 총 5.98W(=11.5V×0.52A)의 전력이 소모되었으며, 발전장

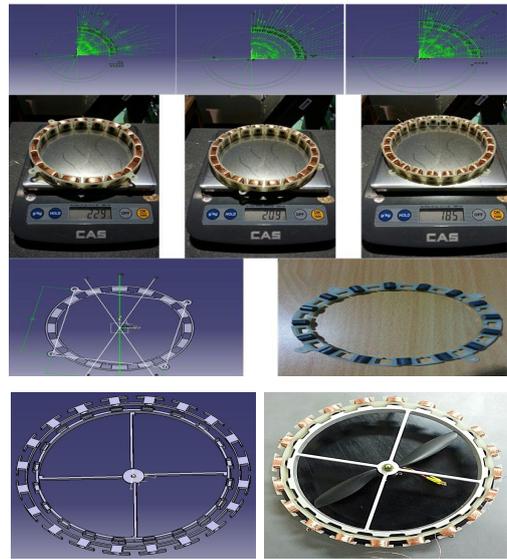


Fig. 9. Rings with cylindrical steel inserts

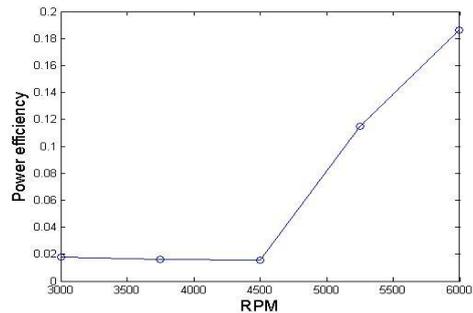


Fig. 10. Power efficiency vs. RPM for the frame (in Fig. 9) including 4 magnets with 90° apart

치가 생산한 전력은 2.51W(=7.84V×0.32A)였다. 따라서 보호링을 활용한 발전장치 자체의 초기 효율은 60.6%(=2.51/(5.98-1.84))로 계산될 수 있다. 발전장치 1에 비해 발전장치 2의 소비전력이 적은 원인은 모터 RPM의 차이에서 기인한다.

발전장치의 효율을 더욱 높이기 위해 20개 폴에 감긴 코일을 병렬로 연결하여 전력을 회수하였다. Fig. 9의 오른쪽 하단의 보호링은 최초 모든 코일이 직렬로 연결되어 있어 코일에서 소모되는 유도전류의 양이 매우 크므로, 각 폴을 감고 있는 코일들 각각에서 나오는 신호들을 병렬로 연결해 전력을 계산하였다. 2000RPM 회전속

1) 배터리충전을 위한 출력전압 승압 시 효율저하는 미비함을 실험을 통해 확인하였다.

도의 경우 병렬로 연결 시 직렬연결 대비 1.73배의 전력이 더 생산됨을 확인하였으며, 이는 3100RPM의 경우 초기 발전효율을 이론적으로 100%까지 향상시킬 수 있음을 의미한다. (3100RPM으로 회전 시 병렬연결로 인해 얻어지는 정확한 추가전력효율은 향후 실험을 통해 검증되어질 예정이다.)

결론적으로, 두 번째 발전장치는 첫 번째 발전장치에 비해 월등히 높은 발전효율을 가지며, 발전장치를 탑재한 후에도 기존의 쿼드콥터의 비행시간에 매우 근접할 수 있는 것으로 파악된다 (발전으로 인한 손실이 거의 없음). 다만 상기 얻어진 전력효율을 이용한 비행시간 계산은 발전장치(보호링 및 자석)의 무게(약 550g)를 고려하지 않은 것으로서, 만약 이 무게가 고려된다면 가능한 비행시간이 다소 감소할 것으로 예상된다. (발전장치의 무게를 고려한다는 것은 발전장치를 탑재한 쿼드콥터가 중력을 이기고 상승할 수 있는 회전속도(약 4500RPM으로 예상)에 대한 실험을 진행해서 제작된 발전장치의 효율을 보다 정확히 확인해야 하지만, 이미 언급했듯이 제작된 발전장치가 가지고 있는 기술적/안전상의 문제로 수행하지 못하였다.)

2.2.4 비행시간 연장을 위한 실험결과와 활용

보호링을 이용한 발전장치(Fig. 9의 우측 하단: 프로펠러(B)와 코일이 감긴 보호링 구성)는 발전장치 1과 동일하게, 상용 쿼드콥터 각 프로펠러(A)의 하단에 설치되어, 프로펠러(A) 상단에서 하단으로 흐르는 공기의 흐름을 이용한 발전에 활용될 수 있다. 앞 절에서 3100RPM으로 회전하는 발전장치 자체의 발전효율은 60.3%임을 확인하였으며, 이 효율은 코일의 병렬연결을 통해 거의 100%에 가까워질 수 있음을 확인하였다. 만일 쿼드콥터가 (프로펠러(A) 바로 아래에) 장착된 보호링 발전장치 내 프로펠러(B)를 3100RPM으로 회전시키면서 비행한다면, 쿼드콥터의 최종 비행시간은 기존 비행시간의 200% 가까이 크게 증가될 수 있을 것으로 추정된다. 다만 이미 언급하였듯이, 보호링 발전장치의 무게가 비행시간을 다소 감소시키리라 예상되지만, 발전장치 1과 비교해 프로펠러(A)의 후류를 막는 장애물이 거의 없어 보다 실용적인 발전이 예상된다.

III. 결 론

본 논문에서는 쿼드콥터의 비행시간 연장을 위한 두 가지 자가발전형 에너지 공급방안을 살

펴보았다. 첫 번째로, 모터와 발전기 축결합을 통한 발전은 쿼드콥터 모터 축에 또 다른 상용 BLDC모터를 달아 그 모터를 발전기처럼 활용해 전력을 생산하는 개념이다. 이 발전장치는 약 89%의 발전효율을 가지며, 따라서 상용 쿼드콥터 프로펠러의 하단에 장착되었을 시 최대 189%의 비행시간 증대를 예상할 수 있다. 두 번째 발전장치는 프로펠러 보호링을 활용한 발전으로, 쿼드콥터 모터의 회전축에 독창적으로 설계된 자석프레임을 결합해 함께 회전시키면 프로펠러 보호링에 감긴 코일에 전류가 유도되어 전력이 생산되는 개념이다. 실험을 통해 이 발전장치는 약 100%에 가까운 높은 발전효율을 가지며, 따라서 최대 200%의 비행시간 증대를 예상할 수 있다. 발전장치의 무게를 고려한다면 상기 계산된 비행시간이 다소 감소하겠지만, 통상적으로 높은 회전속도에서 발전장치의 효율이 더욱 더 나아지는 점과 기존 쿼드콥터 프로펠러 하단에 발전장치를 쉽게 장착할 수 있음을 착안할 때, 두 번째 발전장치가 어느 정도의 실용성이 있다고 예상할 수 있다. 높은 회전속도에 적합하게 현재의 발전장치의 설계를 변경하고, 상용 쿼드콥터에 제안한 보호링 발전기를 장착하고, 그에 따른 발전효율을 확인해 실제 쿼드콥터의 비행에 적용하는 것이 이 논문의 향후 연구방향이다.

후 기

본 연구는 2015년도 경상대학교 연구년제 연구교수 연구지원비 및 2015~2016년도 한국연구재단 이공학개인지초연구(지역대학우수과학자) 지원사업비(NRF-2015R1D1A3A01019680)로 수행되었다. 최초 투고된 논문내용에 대해 유의미한 제안을 많이 해 주신 심사위원들께 깊은 감사료를 드린다.

Reference

- 1) Jang, J, Lee, S., and Ryu. H., "The Technical Trend of Autonomous Control Level for UAV", *The Trend in Aerospace Industry*, Vol. 10. No. 2, Dec. 2012, pp.18~25.
- 2) Mahony, R. and Kumar, V., "Aerial robotics and the quadrotor". *IEEE Robotics Automation Magazine*, Vol. 19, No. 3, September 2012, p. 19.
- 3) Institute for Systems and Robotics,

Instituto Superior Técnico. *The Rescue Project*. URL <http://rescue.isr.ist.utl.pt/>. Consulted on April 2015.

4) Dale, D. R., "Automated Ground Maintenance and Health Management for Autonomous Unmanned Aerial Vehicles". *Master's Thesis*, Massachusetts Institute of Technology. 2007.

5) Valenti, M., Dale, D., and How, J.P., de Farias, D. P., and Vian, J., "Mission Health Management for 24/7 Persistent Surveillance Operations". *AIAA Conference on Guidance, Navigation and Control (2007-6508)*, August 2007, Hilton Head, USA.

6) Swieringa, K. A., Hanson, C. B., Richardson, J. R., White, J. D., Hasan, Z., Qian, E., and Girard, A., "Autonomous Battery Swapping System for Small-Scale Helicopters," *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, May 2010, Anchorage, USA, pp. 3335~3340.

7) Thomas, J. P., Qidwai, M. A., and Kellogg, J. C., "Energy scavenging for small-scale unmanned systems", *Journal of Power Sources*, Vol. 159, No. 2, September 2006, pp. 1494~1509.

8) Ahn, I.-Y., Bae, J.-S., Park, S., and Yang, Y.-M., "Development and Flight Test of a Small Solar Powered UAV", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 11, 2013, pp. 908~914.

9) Amoiralis, E. I., Tsili, M. A., Spathopoulos, V., and Hatziefremidis, A., "Energy Efficiency Optimization in UAVs: A Review", *Materials Science Forum*, Vol. 792, August 2014, pp. 281-286.

10) Flening, J., "Thermoelectric-based power system for UAV/MAV applications", *AIAA's 1st Technical Conference and Workshop on Unmanned Aerospace Vehicles (2002-3412)*, May 2002 Portsmouth, USA.

11) Protonex Technology Corporation, <http://www.protonex.com/>, Consulted on

November 17, 2015.

12) Baldic, J., and Osenar, P., "Fuel cell systems for long duration electric UAVs and UGVs", *Proc. SPIE*, Vol. 7707, April 2010, Orlando, USA.

13) Kim, T., and Kwon, S., "Design and development of a fuel cell-powered small unmanned aircraft", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 27, No. 1, January 2012, pp. 615~622.

14) Choi, M., Kim, D., Kim, I., Kim, J., and Lee, B., "Environment-Friendly Bicycle Using Private Power Station", *Journal of the Korean Society of Electronics and Communication*, Vol. 3, No. 2, 2009, pp. 296~299.

15) Kim, C., Kim, H., and Cho, G., "A LED Actuation Circuit Plan for Hybrid Bike using Hub Dynamo", *Proceedings of the Korean Society of Electricity*, Vol. 2013, No. 7, 2013, pp. 83~84

16) Park, W. "Study on a non-contact generator and charging system for bicycles", *Master's Thesis*, Seoul Institute of Science and Technology, August 2014.

17) Lee, S., Cho, J., and Kim, D., "Trend in development of electric car actuator systems", *Journal of Power Electronics*, Vol. 16, No. 2, April 2011, pp. 32~37.

18) Chang, E., and Choi, S., "Design of generator of the hybrid powered aerial robot", *Proceedings of the Korean Society of Aeronautical and Space Sciences*, November 2013, pp. 1247~1250.

19) Chung, T., "Trend in portable electric generator technology", *Journal of the Korean Society of Power Electronics*, Vol. 12, No. 5, 2007, pp. 54~59.

20) Kim, Y., "Self-powered quadcopter", Patent 10-1407722, Korean Intellectual Property Office, June 2014.

21) <http://hackedgadgets.com/2010/10/05/3-phase-rectifier-basics/>, Consulted on January 26, 2016.