

# 저가의 측정 장비를 이용한 모터와 변속기 통합 효율 맵 도출 기법

## Obtaining Motor-ESC Combined Efficiency Map Using a Low Cost Measurement Equipment

이석환<sup>1\*</sup> · 황현수<sup>1</sup> · 남홍수<sup>1</sup> · 이학태<sup>1</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 항공우주공학과

Seok-hwan Lee<sup>1\*</sup> · Hyeon-su Hwang<sup>1</sup> · Hong-su Nam<sup>1</sup> · Hak-Tae Lee<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon, Korea

### [Abstract]

Even though brushless DC motors are known to be efficient, there exist ranges of rotational speeds and torques that a motor can maintain its peak efficiency. In addition, the efficiency of Electronic Speed Controllers is not a constant. This paper presents a process of obtaining a motor-ESC combined efficiency map using a low cost measurement equipment. First, the accuracy of the equipment is verified using propeller test data. And then, by performing static measurements of various propellers, the combined efficiencies are measured for a wide range of rpm and torque, which leads to an efficiency map. These maps will be useful for the design optimization of electric propulsion systems, especially for applications where the propulsion efficiency is critical.

### I. 서론

일반적으로 모터는 효율이 높은 것으로 알려져 있으나, 실제로 효율이 높은 운용 범위는 한정되어 있다. 따라서 전기 비행체의 전체 추진 효율을 높이기 위해서는 모터의 효율 특성을 파악하는 것이 중요하다.

관련 연구 [1]에서는 모터, 프로펠러, 항공기 기체의 조합에 대하여 각각의 효율 맵을 겹쳐서 도시하여 각각의 효율과 전체 시스템 효율을 파악하고 최적의 조합을 찾을 수 있는 기법을 제시하였다.

하지만 모터를 구동하는 ESC (Electronic Speed Controllers)도 작동 영역에 따라서 효율이 달라지기 때문에, 실제로는 모터와 ESC의 통합 효율이 중요하다. 특히 일반 소비자 등급의 모터와 ESC의 경우 제조사에서 제한된 데이터만을 제공하고, 제공된 데이터의 신뢰성이 높지 않기 때문에 실제로 사용하고자 하는 후보군에 대한 측정값을 얻는 것이 중요하다. 하지만 정밀한 측정을 위해서는 모터의 추력과 토크 측정 장비를 풍동 안에 넣어서 실험을 진행해야 하는데 이러한 실험은 일반적으로 큰 비용이 든다.

이러한 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 모터와 ESC의 통합 효율을 측정하기 위해 TYTO Robotics [2]의 측정 장비를 사용하여 풍동을 이용하지 않고 다수의 프로펠러를 이용하여 다양한 운용범위에서의 데이터를 획득하였다.

2장에서는 UIUC (University of Illinois Urbana-Champaign)

propeller database와 비교·분석을 통해 장비에 대한 신뢰성을 검증한다. 3장에서는 우선 이론적인 모터 효율 계산 방법을 통해 도식화한 모터의 효율 맵을 보여준다. 다음으로 다양한 프로펠러 측정한 데이터로부터 실제 모터-ESC 효율 맵을 도출하고, 이론적 효율 맵과 도출한 효율 맵의 차이가 발생하는 이유에 대해 분석한다.

### II. 모터 측정 장비의 정확성 검증

본 연구에서는 TYTO ROBOTICS 사의 Series 1580 Test Stand 장비를 사용해 모터 데이터를 측정하였다. 그림 1은 연구에 사용한 모터 측정 장비이다.

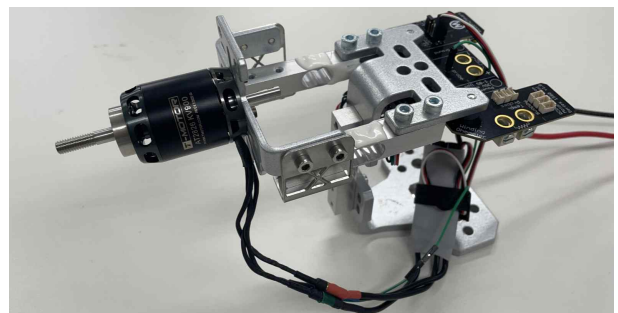


그림 1. TYTO ROBOTICS Series 1580 Test Stand

UIUC에서는 무인 항공기와 모형 항공기에 사용되는 프로펠러들의 풍동 측정 데이터를 제공하고 있다 [3]. 데이터 측정 장비에

\* Corresponding Author

대한 신뢰성을 검증하기 위해 UIUC propeller database와 비교·분석했다. 모터는 T-Motor 사의 AT2826-KV900 모델을 사용하였고, 간략한 제원은 표 1과 같다.

표 1. Specifications of AT2826-KV900 Long Shaft Motor

Reference	Value
$K_v$	900 rpm/V
Internal Resistance, $r$	24 mΩ
Idle Current (10V), $i_0$	2.2 A

표 1의  $K_v$ 는 1V당 분당회전수이고, Idle Current는 대기 전류로 전원을 인가하고 아무런 동작을 하지 않을 때 흐르는 전류를 의미한다.

APC Sport 11x7 프로펠러를 Tractor와 Pusher 두 가지 방향으로 측정해 UIUC Propeller Database의 추력계수,  $C_T$ , 동력계수,  $C_P$ 와 비교하였다. 비교 결과는 그림 2, 그림 3과 같다.

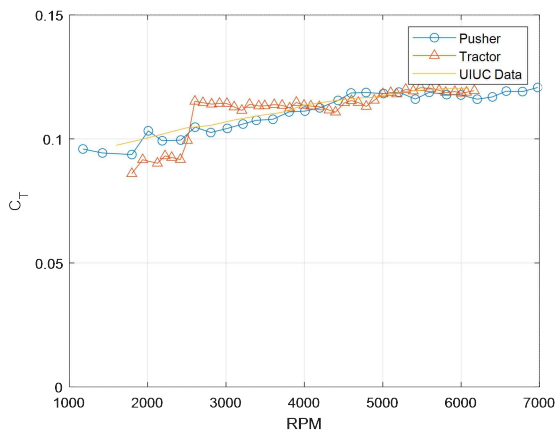


그림 2. Thrust coefficient,  $C_T$  of APC Sport 11x7

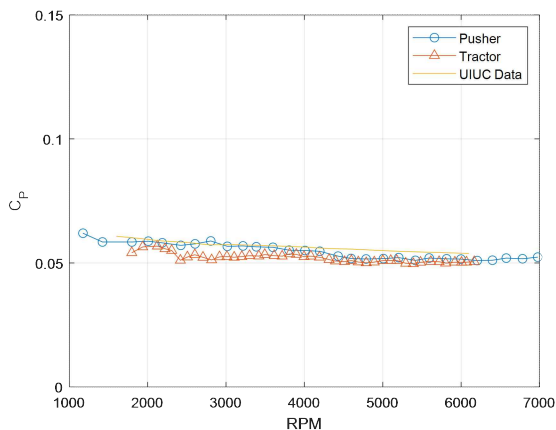


그림 3. Power coefficient,  $C_P$  of APC Sport 11x7

Tractor 방향의 측정 데이터와 UIUC 측정 데이터의 오차는 약

8% 내외이고, Pusher 방향의 측정 데이터와 UIUC 측정 데이터의 오차는 약 5% 내외이다. Pusher 방식을 사용하면 Tractor 방식이라면 프로펠러 후류를 방해했을 측정 장비가 프로펠러의 앞에 위치하게 되는데, 정적 추력 측정에서 프로펠러 앞의 유속은 0에 가깝기 때문에 측정 장비가 유동에 미치는 영향이 작아서 정확도가 높아진 것이다. 이후 실험은 Pusher 방향으로 진행하였다.

### III. 모터와 ESC 통합 효율 맵

#### 1. 이론적인 모터 효율 계산

표 1의  $K_v$ 의 단위는 rpm/V이고 역기전력 상수,  $K_e$ 의 단위는 V·s이므로  $K_e$ 는 식 (1)과 같이 표현된다.

$$K_e = \frac{30}{\pi} \frac{1}{K_v} \quad (1)$$

표준 단위를 사용하면 토크 상수,  $K_t$ 는  $K_e$ 와 같다.

$$v = ir + v_{emf} = ir + K_e \omega \quad (2)$$

$$i = \frac{Q + Q_f}{K_t} = \frac{Q + K_t i_0}{K_t} \quad (3)$$

여기서 회전속도,  $\omega$ 의 단위는 rad/s이고, DC 모터 방정식에 의해 식 (2)의 역기전력,  $v_{emf}$ 는  $K_e$ 와  $\omega$ 에 비례하고, 식 (3)의 미찰 토크,  $Q_f$ 는 대기전류,  $i_0$ 와 토크 상수의 곱으로 고정된 값인 단순한 모델을 이용했다 [3]. 또한 모터 효율 식은 식 (4)와 같다.

$$\eta_m = \frac{Q\omega}{vi} \quad (4)$$

그림 4는 표 1의 제원과 식 (1) ~ (4)로부터 계산된 모터 효율 맵을 x축은 rpm, y축은 torque로 표현한 평면에 나타낸 것이다.

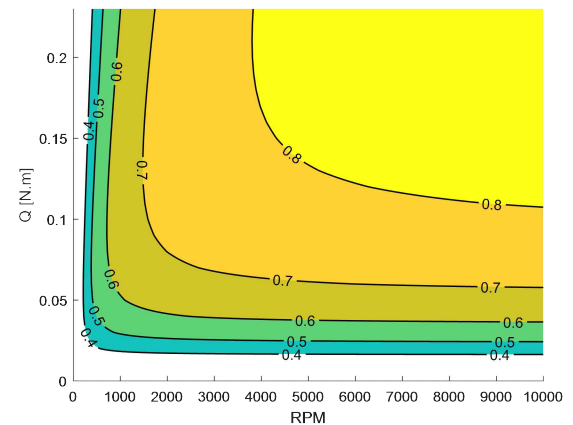


그림 4. Motor efficiency map

## 2. 다양한 프로펠러를 이용한 데이터 측정

데이터 측정은 RCbenchmark의 GUI 프로그램을 이용했다. 효율 맵을 그리기 위해 총 10개의 프로펠러 데이터를 측정하였고, 측정에 사용한 프로펠러 형상과 타입은 그림 5, 표 2와 같다.



그림 5. Propellers used for the measurement

표 2. List of propellers

Propeller	
APC Sport 4.75x4.75	APC Sport 9x4.7
APC Sport 6.3x4	APC Sport 10x3.8
APC Sport 6x5.5	APC Sport 11x4.7SF
APC Sport 8x3.8	APC Sport 11x7
APC Sport 8x6	APC Sport 11x8

프로펠러 측정을 통해 얻은 데이터 중 rpm, torque, voltage, current를 식 (4)에 적용해 모터 효율을 계산하였고 그 결과는 그림 6과 같다.

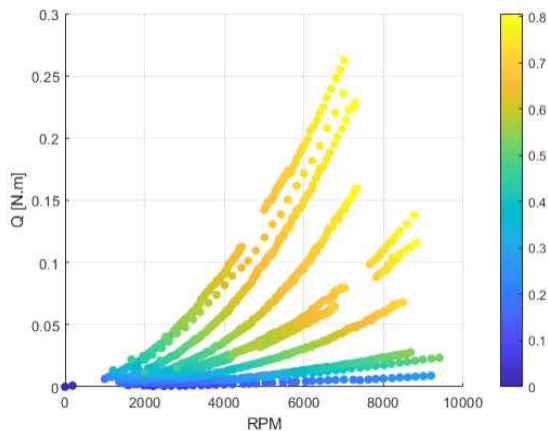


그림 6. Motor-ESC efficiency obtained by measuring the propellers

그림 6에서 각 점은 프로펠러의 효율 값이다. 프로펠러의 직경이 클수록 큰 기율기의 효율 곡선이 나타나는데 본 연구에서는 10개의 프로펠러 측정을 통해 넓은 범위의 데이터를 얻었다.

이를 바탕으로 효율 맵을 도식화했고, 그 결과는 그림 7과 같다.

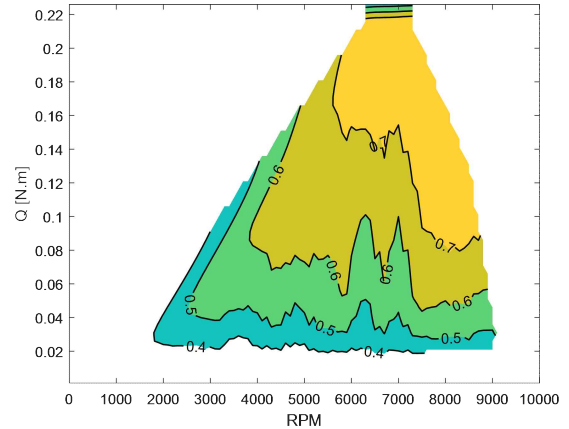


그림 7. Motor-ESC efficiency map by measurement

그림 4에서는 낮은 rpm 영역에서 등고선이 수직에 가까운 형태를 보이지만 수행한 실험에서는 기울어진 형태의 등고선을 보인다. 차이가 생기는 이유는 단순한 DC 모터 모델에서는 마찰 토크가 일정하다고 가정하였지만, 실제 모터에서는 회전하면서 생기는 공기 저항으로 인해 windage loss 등 추가적인 손실이 반영되어 있으며, 특히 약 85 ~ 90% 정도 되는 ESC의 효율이 반영되었기 때문이다.

## IV. 결 론

본 논문에서는 다양한 종류의 프로펠러들에 대한 정적 측정을 이용하여 rpm과 torque에 따른 효율 데이터를 넓은 범위에 걸쳐 얻었고, 최종적으로 모터와 ESC가 결합된 효율 등고선 맵을 도출하였다. 또한 단순한 DC 모터 모델로 계산한 효율 맵과 유의미한 차이가 있는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 측정 방법을 이용하여 전기 추진 시스템을 최적화 할 수 있다. 이러한 기법은 고고도 장기체공 무인기, 도심 항공교통 (UAM; Urban Air Mobility) 항공기와 같이 전기 추진 시스템을 사용하는 항공기의 설계에 큰 도움이 될 것이다.

## Acknowledgments

본 연구는 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원의 연구비 지원(과제번호: 20016489)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## References

- [1] H. T. Lee, "A Technique for Matching Propeller, Motor, and Airframe of an Electric Powered Aircraft Based on Efficiency Maps," *AIAA SCITECH 2022 Forum*, pp. 0885, 2022.
- [2] Tyto Robotics Inc. Series 1580: Drone Test Stand [Internet]. Available: <https://www.tytorobotics.com/pages/series-1580-1585>

- [3] J.B. Brandt, R.W. Deters, G.K. Ananda, O.D. Dantsker, and M.S. Selig (2022, October). UIUC Propeller Database. *University of Illinois at Urbana-Champaign* [Internet]. Available: <https://m-selig.ae.illinois.edu/props/propDB.html>.
- [4] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, WILEY, pp. 153-155, 2012.