

등치선도를 이용한 모터와 전자 변속기 통합 효율 분석

Analysis of Combined Motor and Electronic Speed Control Efficiency Using Contour Plots

이석환 · 황현수 · 남홍수 · 이학태*
인하대학교 항공우주공학과

Seokhwan Lee · Hyeonsu Hwang · Hong-Su Nam · Hak-Tae Lee*

Department of Aerospace Engineering, Inha University, Incheon, 21999, Korea

[요 약]

모터와 ESC (Electronic Speed Control)는 높은 효율을 유지할 수 있는 회전 속도 및 토크의 범위가 존재하기 때문에, 효율적인 시스템 설계를 위해서는 이 범위를 파악하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 먼저 측정 장비 대한 정확성을 프로펠러 측정 데이터와 비교 분석하여 검증하였다. 다음으로, 넓은 회전 속도 범위에서의 정적 측정을 통해 각 프로펠러에 대한 통합 효율을 측정하고, 이를 다수의 프로펠러에서 반복하여 얻은 데이터를 이용하여 효율 등치선도를 도출하였다. 측정된 모터-ESC 통합 효율은 단순한 모터 모델로 도출한 모터 자체의 효율과 비교할 때 상당한 차이가 있음을 확인하였고, 또한 동일한 모터라도 ESC에 따라 달라지는 효율의 차이를 분석하였다. 본 연구를 통해 도출한 모터-ESC 통합 효율 등치선도는 추진 효율이 중요한 항공기의 전기 추진 시스템을 설계하고 최적화하는 데에 유용하게 사용될 것으로 예상된다.

[Abstract]

Because there exist a region in the rotational speed and torque map that the a particular combination of a motor and an ESC (Electronic Speed Control) can maintain its peak efficiency, identifying this region is important for designing an efficient system. Firstly the accuracy of the measurement device is verified using the published propeller measurement data. And then, the combined motor-ESC efficiencies of an individual propeller are measured at a wide range of rotational speeds. With measurements obtained from a large number of different propellers, efficiency contours are obtained. It is shown that there exist a significant difference between the measured combined efficiency and the motor efficiency computed using a simple model. In addition, with the same motor, the combined efficiency can have a meaningful variation depending on the model of the ESC. The efficiency contours derived from this study will be useful for the design and optimization of electric propulsion systems of an aircraft where propulsion efficiency is critical.

Key word : Efficiency contour, Electric propulsion system, ESC, Motor, Propeller.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.2.214>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 23 March 2023; **Revised** 31 March 2023

Accepted (Publication) 26 April 2023 (30 April 2023)

***Corresponding Author; Hak-Tae Lee**

Tel: +82-10-9425-8232

E-mail: seokhwan-lee@inha.edu

I. 서론

모터의 효율은 높은 것으로 알려져 있으나, 실제로 회전 속도 및 토크 범위에 따라 효율이 높은 운용 범위는 한정되어 있다. 따라서 전기 추진 비행체의 전체 추진 효율을 높이기 위해서는 모터의 효율 특성을 파악하는 것이 중요하다.

[1]에서는 전기 추진 비행체의 모터, 프로펠러, 항공기 기체의 조합에 대하여 각각의 효율 등치선도를 겹쳐 도시하여, 각각의 효율과 전체 시스템 효율을 파악하고 최적의 조합을 찾을 수 있는 기법을 제시하였다. 하지만 모터를 구동하는 핵심 부품인 ESC (Electronic Speed Control) 또한 운용 영역에 따라 효율이 달라지기 때문에, 실제로는 모터의 효율과 ESC의 효율을 모두 고려한 통합 효율이 중요하다. 모터와 ESC의 경우 제조사에서 제한된 데이터만을 제공하고, 데이터의 신뢰성이 높지 않기 때문에 실제로 사용하고자 하는 후보군에 대한 측정값을 얻어야 정확한 분석이 가능하다. 다양한 비행 속도에서 모터의 추력과 토크의 정밀한 측정을 위해서는 풍동을 이용하는 것이 일반적이다. 하지만 이러한 측정 방법은 장소의 제약이 있고 큰 비용이 든다는 단점이 존재한다.

[2]에서는 풍동 없이 저가의 측정 장비를 사용하여 모터와 ESC 통합 효율 등치선도를 도출하는 기법을 제시하였다. 본 논문에서는 [2]를 보완하여 프로펠러를 추가하고 회전 속도의 간격을 조절하여, 보다 넓은 영역에서 조밀한 측정 데이터를 획득하였고, 데이터의 처리에 있어서도 정규화와 보간을 통해 보다 신뢰성 있는 모터-ESC 효율 등치선도를 도출하였다.

2장에서는 일반적인 모터 효율 이론을 제시하고, 이를 적용한 모터의 효율 등치선도를 도식화하였다 [3]. 3장에서는 UIUC (University of Illinois Urbana -Champaign) propeller database와 측정 데이터를 비교 및 분석하여 저가의 측정 장비에 대한 신뢰성을 검증하였다. 4장에서는 하나의 모터와 두 개의 ESC에 대하여 다수의 프로펠러를 사용한 측정을 통해 획득한 데이터로부터 모터-ESC 효율 등치선도를 도출하였고, 이론적인 모터 효율과 모터-ESC 효율의 차이가 발생하는 이유와 ESC에 따른 효율 등치선도의 차이에 대해 분석하였다.

II. 모터 효율 등치선도

모터의 이론적인 효율을 계산하기 위해 제조사에서 제공하는 기본적인 값이 필요하다. 본 연구에서 사용한 모터의 간략한 제원은 표 1과 같다.

표 1. AT2826-KV900 제원

Table 1. Specifications of AT2826-KV900

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

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

본 논문에서는 단순한 모델인 Equivalent circuit model을 이용하여 브러시리스 DC 모터 효율을 계산하였다 [4], [5]. 마찰 토크 Q_f 는 모터의 마찰로 인한 손실이며, Q_f 는 대기 전류와 토크 상수 K_t 에 비례하는 회전 속도를 고려하지 않는 상수로 가정하였다. 또한 K_t 와 역기전력 상수 K_e 는 같다고 가정하였다. 따라서, Q_f 는 식 (1)과 같다.

$$Q_f = K_t i_0 = K_e i_0 \quad (1)$$

마찰 토크를 반영한 토크, Q 는 식 (2)와 같다.

$$Q = K_t \left(\frac{v_m - K_e \omega}{r} \right) - Q_f = K_e \left(\frac{v_m - K_e \omega}{r} \right) - K_e i_0 \quad (2)$$

모터에 인가되는 전압 v_m 과 전류 i_m 는 각각 식 (3), (4)와 같다.

$$v_m = i_m r + v_{emf} = i_m r + K_e \omega \quad (3)$$

$$i_m = \frac{Q + Q_f}{K_t} = \frac{Q + K_t i_0}{K_t} \quad (4)$$

모터 제조사에서 제공하는 K_v 의 단위는 rpm/V이고, K_e 의 단위는 V·s이므로 표준 단위를 사용하면 K_e 는 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_e = \frac{30}{\pi} \frac{1}{K_v} \quad (5)$$

모터의 효율은 모터에 인가되는 전력과 모터의 축에서 낼 수 있는 동력의 비로 표현된다. 따라서 모터 효율 η_m 은 식 (6)과 같다.

$$\eta_m = \frac{\text{output power}}{\text{input power}} = \frac{Q\omega}{v_m i_m} \quad (6)$$

따라서, 모터 효율은 식 (1)~(6)을 이용하여 RPM과 Torque만의 함수로 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\eta_m(\omega, Q) = \frac{Q\omega}{Q\omega + (r_i^2 + i_0 K_v \omega + \frac{2r_i i_0}{K_e} Q + \frac{r}{K_e^2} Q^2)} \quad (7)$$

$$= \frac{Q\omega}{Q\omega + (r_i^2 + (\frac{30}{\pi}) \frac{i_0}{K_v} \omega + 2(\frac{\pi}{30}) r_i i_0 K_v Q + (\frac{\pi}{30})^2 r K_v^2 Q^2)}$$

그림 1은 표 1과 식 (7)으로부터 계산한 모터 효율을 x축은 RPM, y축은 Torque로 표현한 평면에 나타낸 것이다.

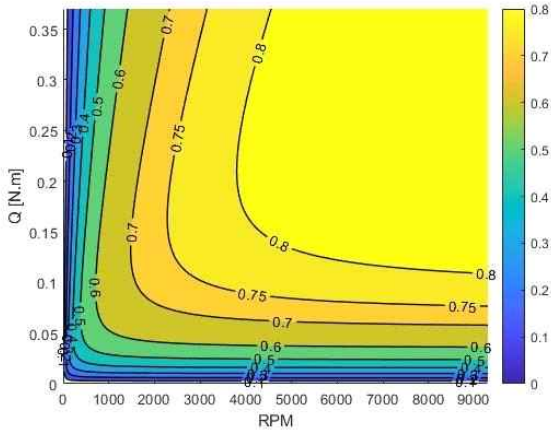


그림 1. AT2826-KV900 모터 효율 등치선도
Fig. 1. Efficiency contour of the AT2826-KV900 motor

III. 데이터 측정 장비의 정확성 검증

본 논문에서는 TYTO ROBOTICS 사의 Series 1580 장비를 사용해 모터-ESC 통합 데이터를 측정하였다. 그림 2는 본 연구에 사용한 모터-ESC 측정 장비이다 [6].

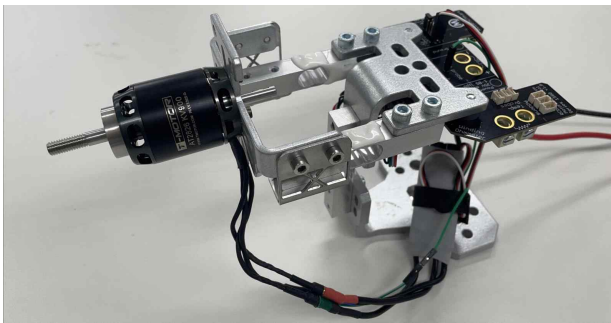


그림 2. 모터-ESC 데이터 측정 장비 “TYTO ROBOTICS Series 1580” [6]
Fig. 2. Measuring equipment of Motor-ESC combined data “TYTO ROBOTICS Series 1580” [6]

UIUC에서는 무인 항공기와 모형 항공기에 사용되는 다양한

종류의 프로펠러들의 실제 풍동 측정 데이터를 제공한다 [7]. 본 논문에서는 장비에 대한 정확성을 검증하기 위해 UIUC propeller database와 비교 분석하였다. 9x4.7SF Slow Flyer 프로펠러를 후류가 측정 장비 방향으로 발생하는 견인식(Tractor) 프로펠러와 측정 장비 반대 방향으로 발생하는 추진식(Pusher) 프로펠러 두 가지 방향으로 측정하여 추력계수 C_T 와 동력계수 C_P 를 비교하였다. 추력계수와 동력계수는 식 (8), (9)와 같이 계산할 수 있으며, 여기서 n 은 1초당 회전수이고 D 는 프로펠러의 직경을 의미한다.

그림 3, 그림 4는 측정 데이터와 UIUC 프로펠러 데이터를 식 (8), (9)를 통해 계산하여, RPM에 따른 추력계수와 동력계수를 나타낸 것이다.

$$C_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (8)$$

$$C_P = \frac{P}{\rho n^3 D^5} \quad (9)$$

표 2. 9x4.7 프로펠러의 측정 데이터와 UIUC 데이터의 평균 오차
Table 2. Mean error of 9x4.7 propeller between measurement data and UIUC data

	Thrust coefficient	Power coefficient
Pusher	2.71%	0.80%
Tractor	7.02%	5.31%

표 2의 오차 계산 결과 추진식 프로펠러 측정 데이터가 견인식 프로펠러 측정 데이터보다 UIUC 프로펠

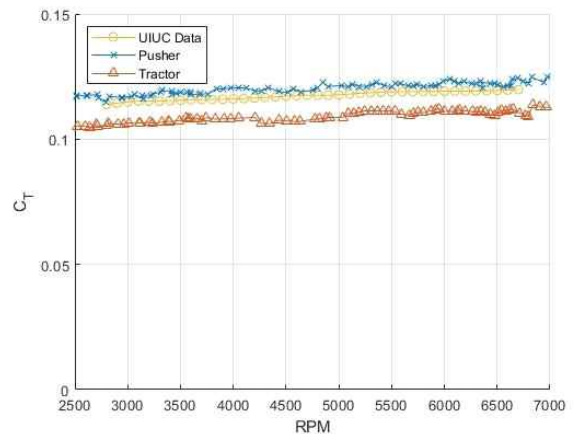


그림 3. 9x4.7 프로펠러와 UIUC 데이터의 추력계수, C_T
Fig. 3. Thrust coefficient, C_T of 9x4.7 propeller and UIUC data

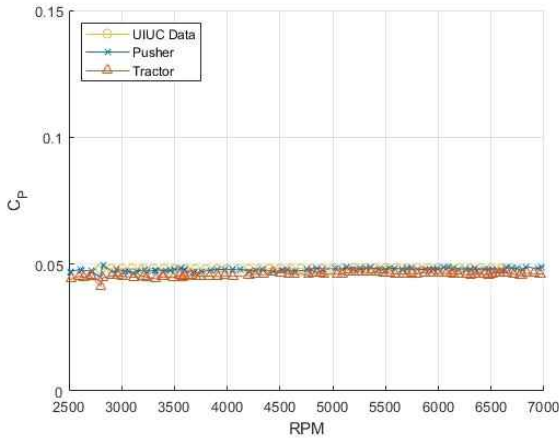


그림 4. 9x4.7 프로펠러와 UIUC 데이터의 동력계수, C_p
 Fig. 4. Power coefficient, C_p of 9x4.7 propeller and UIUC data

러 데이터에 더 근접한다. 견인식 프로펠러 방식은 측정 장비가 프로펠러 후류를 방해하지만, 추진식 프로펠러 방식은 측정 장비가 프로펠러의 앞에 위치하게 된다. 정적 추력 측정에서 프로펠러 앞의 유속은 0에 가깝기 때문에 측정 장비가 유동에 미치는 영향이 적다. 따라서, 측정 데이터의 정확도는 견인식 프로펠러보다 추진식 프로펠러가 더 높다. 이를 바탕으로, 프로펠러 데이터 측정은 추진식 프로펠러로 진행하였다.

IV. 모터-ESC 효율 등치선도 도출

4-1 프로펠러를 이용한 데이터 측정

모터-ESC 효율을 측정하기 위해 다양한 종류의 프로펠러들을 이용하였다. 본 연구에 사용한 프로펠러 형상과 목록은 그림 5, 표 3와 같다.



그림 5. 측정에 사용한 프로펠러 형상
 Fig. 5. Shapes of propeller used for the measurement

표 3. 프로펠러 목록

Table 3. List of propellers

Propeller	
4.75x4.75E Speed 300 Electric	10x8E Thin Electric
6.3x4 Combat	11x4.7SF Slow Flyer
6x5.5E Thin_Electric	11x7 Sport
8x3.8SF Slow Flyer	11x8 Sport
8x6E Thin Electric	12x6SF Slow Flyer
9x4.7SF Slow Flyer	13x8 Sport
10x3.8SF Slow Flyer	

RPM-Torque 평면에 효율 등치선도를 도시하기 위해 총 13개의 프로펠러 데이터를 그림 2의 모터와 두 종류의 ESC를 결합해 측정하였다. 본 연구에 사용한 ESC 제원은 표 4와 같다.

표 4. ESC 제원

Table 4. Specifications of ESC

Model	Continuous Current [A]	Weight [g]	Size [mm]
AT 40A UBEC	40	43	65×25×12
AT 55A UBEC	55	63	77×35×14

4-2 모터-ESC 효율 등치선도

데이터 측정 시 ESC에 입력되는 전압 v_e 은 14.0 V, 최대 회전수는 10000 rpm, 그리고 최대 토크는 0.4 N·m을 넘지 않게 측정하였다.

총 두 개의 ESC를 이용하여 두 가지 경우로 프로펠러들을 측정하였고, 결과로 얻은 데이터 중 RPM, Torque, Voltage, Current와 식 (6)을 이용해 모터 효율을 계산하였다.

본 논문에서는 다양한 크기의 프로펠러 측정을 통해 넓은 범위의 데이터를 얻었다. 그림 6과 그림 8은 프로펠러에 대해 측정된 모터-ESC의 효율을 나타낸다. 프로펠러의 직경이 클수록 큰 기율기의 효율 곡선이 나타나는 경향을 보인다.

분 당 회전수로 표현된 RPM과 Nm단위로 표시된 Torque는 대략 1만 배의 차이를 가지게 되어 그대로 보간을 할 경우에 수치적인 오차가 발생하여 정확한 등치선도를 얻을 수 없음을 확인하고, 각 축의 최댓값, 최솟값을 이용하여 데이터를 정규화한 후 보간을 통하여 격자 상의 모든 점에서 효율 값을 계산하였다. 이를 바탕으로 RPM과 Torque 평면에 효율 값을 높이로 갖는 효율 등치선도를 도시하였다. 결과는 ESC에 따라 각각 그림 7, 그림 9와 같다.

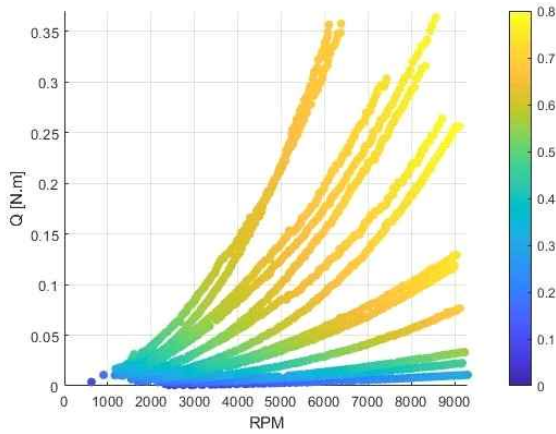


그림 6. 프로펠러 측정을 통해 얻은 모터-ESC(AT 40A) 효율
Fig. 6. Motor-ESC(AT 40A) efficiency obtained by measuring the propellers

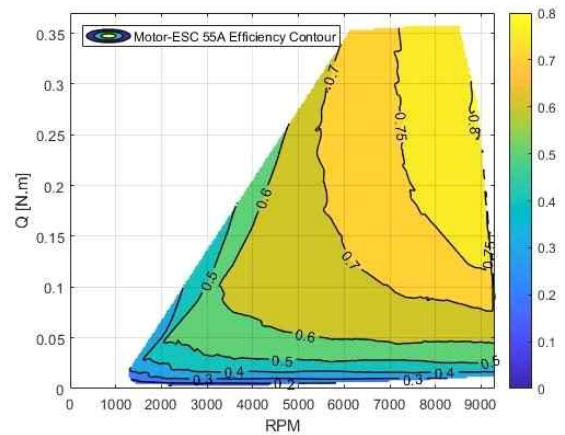


그림 9. 모터-ESC(AT 55A) 효율 등치선도
Fig. 9. Motor-ESC(AT 55A) efficiency contour

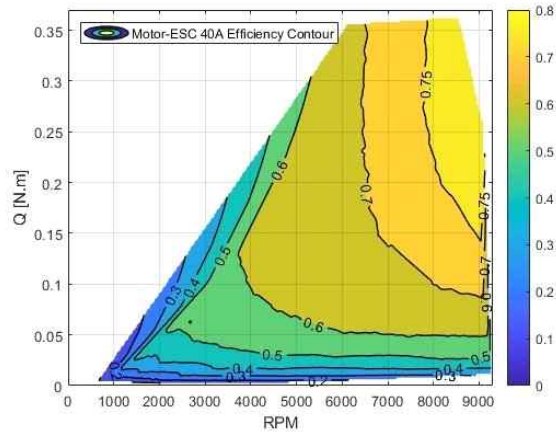


그림 7. 모터-ESC(AT 40A) 효율 등치선도
Fig. 7. Motor-ESC(AT 40A) efficiency contour

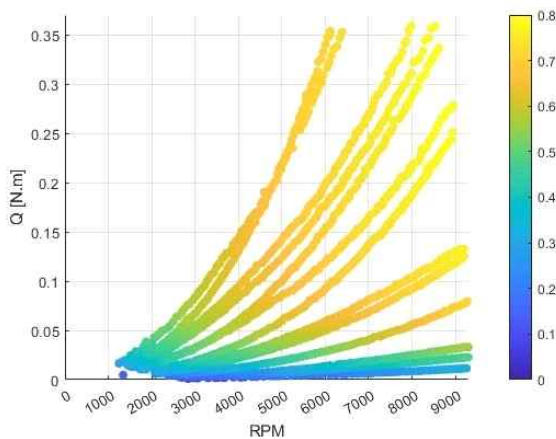


그림 8. 프로펠러 측정을 통해 얻은 모터-ESC(AT 55A) 효율
Fig. 8. Motor-ESC(AT 55A) efficiency obtained by measuring the propellers

측정 결과로부터 도식화한 모터-ESC 효율 등치선도에서 낮은 RPM에 높은 토크가 필요한 영역의 측정 데이터를 얻기 위해서는 큰 직경의 프로펠러나 큰 피치각을 가지는 프로펠러가 필요하다. 하지만 이 영역에서는 프로펠러 깃의 국소 받음각이 매우 커서 실속이 발생했을 수도 있기 때문에, 프로펠러의 효율을 감안하면 일반적으로는 사용되지 않는 영역이고, 따라서 측정값을 얻지 않았다.

그림 4의 모터 효율 등치선도에서는 낮은 RPM 영역에서 등치선이 수직에 가까운 형태를 보이지만 측정 결과 우상향으로 기울어진 형태의 등치선을 보인다. 계산 결과와 측정 결과의 차이가 생기는 이유는 단순한 등가회로 DC 모터 모델에서는 마찰 토크가 회전 속도에 관계없는 상수로 가정하였지만, 실제로는 모터의 회전자가 회전하면서 생기는 공기 저항으로 인해 Windage loss 등 추가적인 손실이 반영되어 있기 때문이다.

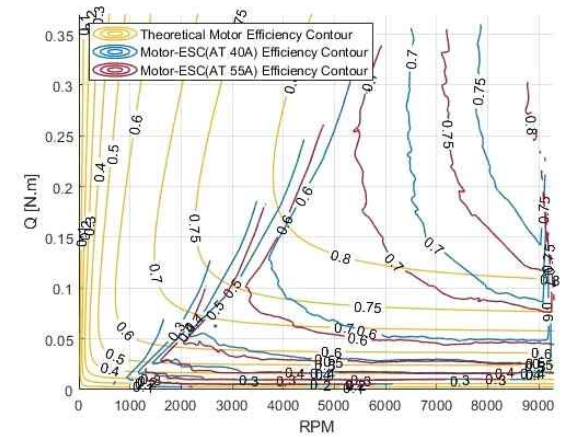


그림 10. 이론적인 모터 효율 등치선도와 두 가지 조합의 모터-ESC 효율을 겹친 등치선도
Fig. 10. Overlapped efficiency contours of the theoretical motor and Motor-ESC.

그림 10은 이론적인 모터 효율과 모터-ESC 조합의 효율을 비교하였다. 앞에서 설명한 등가회로 모터 모델의 한계에 추가하여 약 85% ~ 90% 정도의 ESC 효율이 반영되어 전체적으로 모터-ESC의 통합 효율은 이론적인 모터 자체의 효율에 비해 10% 이상 작은 것을 볼 수 있다.

ESC에 따른 차이를 살펴보면 더 큰 전력을 감당할 수 있는 AT 55A 모델이 효율이 더 높고 특히 고효율 영역에서 그 차이가 두드러짐을 볼 수 있다. 이는 더 큰 전력을 감당하기 위해서 ESC의 내부 저항이 더 작기 때문이라고 해석할 수 있다. 다만 표 4에 제시된 것과 같이 AT 55A의 중량이 더 크기 때문에, 항공기의 전체 중량에 대비 비중을 고려하여 ESC의 중량 비중이 작다면 더 큰 용량의 ESC를 선택하는 것이 효율 면에서 유리함을 알 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 하나의 모터와 두 개의 ESC의 조합에 대하여 다수의 프로펠러를 이용한 정적 측정을 통해 넓은 범위의 RPM 과 Torque에서 효율 데이터 얻었고, 데이터 정규화를 통해 최종적으로 모터-ESC 통합 효율 등치선도를 도출하였다. 단순한 등가회로 DC 모터 모델로 계산한 효율 등치선도와는 유의미한 차이가 있는 것을 확인하였고, 통합 효율 기준 저효율 영역에서는 ESC 간의 차이가 크지 않았으나, 고효율 영역에서는 용량이 큰 ESC가 유리함을 밝혔다. 다만 항공기에서 크기와 무게가 중요한 요소이므로 사용하고자 하는 범위에서 알맞은 ESC를 선택하는 것이 중요하다.

본 논문에서 제시한 측정 방법을 이용하여 전기 추진 시스템을 최적화할 수 있다. 이러한 기법은 고고도 장기체공 무인기, 도심항공교통 (UAM; Urban Air Mobility) 항공기와 같이 효율적인 전기 추진 시스템을 사용하는 항공기의 설계에 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

Acknowledgments

본 연구는 국토교통부의 ‘빅데이터 기반 항공안전관리 기술 개발 및 플랫폼 구축 (과제번호 : RS-2020-KA158275)’과 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원의 ‘eVTOL 비행안정성 운용성 실증시험평가 및 충돌회피처리 기술 개발 (과제번호 : 20016463)’ 연구의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 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*, San Diego, CA, pp. 0885, 2022.
- [2] S. Lee, H. Hwang, H. S. Nam, H. T. Lee, “Obtaining Motor-ESC Combined Efficiency Map Using a Low Cost Measurement Equipment,” in *Proceedings of the 2022 Technical Meeting of the Korea Institute of Navigation*, Seoul, Vol. 26, No. 1, pp. 89-92, 2022.
- [3] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, WILEY, pp. 153-155, 2012.
- [4] R. A. McDonald, “Electric Motor Modeling for Conceptual Aircraft Design,” *51st AIAA Aerospace Sciences Meeting*, Grapevine, TX, pp. 0941, 2013.
- [5] H. S. Nam, H. Hwang, S. Lee, H. T. Lee, “Electric Propulsion System Optimization Using Performance Maps,” *2023 IEEE Aerospace Conference*, Big Sky, MT, 2023.
- [6] Tyto Robotics Inc. Series 1580: Drone Test Stand [Internet]. Available: <https://www.tytorobotics.com/pages/series-1580-1585>.
- [7] 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>.



이 석 환 (Seokhwan Lee)

2023년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2023년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※ 관심분야 : 항공교통, 항공기 공력 설계



황 현 수 (Hyeonsu Hwang)

2023년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2023년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석사과정
※ 관심분야 : 항공교통, 항공기 공력 설계



남 흥 수 (Hong-Su Nam)

2021년 2월 : 인하대학교 항공우주공학과 (공학사)
2021년 3월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 석·박사 통합과정
※ 관심분야 : 항공교통, 항공기 공력 설계



이 학 태 (Hak-Tae Lee)

2006년 1월 : 미국 스탠포드대학교 항공우주공학과 (공학박사)
2013년 9월 ~ 2017년 8월 : 인하대학교 항공우주공학과 조교수
2017년 9월 ~ 2022년 9월 : 인하대학교 항공우주공학과 부교수
2022년 9월 ~ 현재 : 인하대학교 항공우주공학과 정교수
※ 관심분야 : 항공교통, 항공기 공력 설계