

하이브리드 무인 헬리콥터의 동력 계통 설계

박정환*, 이학태
인하대학교

Power System Design and Analysis for Hybrid Unmanned-Helicopter

Jung-Hwan Park* and Hak-Tae Lee

Key Words : Parallel-Hybrid(병렬-하이브리드), BLDC Motor(브러시리스 직류전동기), UAS(무인기), Rotary Engine(로터리 기관), Power Optimization(동력 최적화)

서론

미국과 같이 농장의 면적이 넓은 곳에서는 이미 유인항공기를 이용한 항공방제가 실시되어 왔다. 한국의 경우는 최근 각광받는 무인항공기 또는 드론을 이용한 방안이 연구되고 있다⁽¹⁾.

흔히 무인기에 사용되는 배터리 시스템은 비 동력(specific power)이 높아 기동과 수직이착륙 등과 같은 순간적인 에너지 소모가 큰 운동에 적합하나, 체공 시간이 짧다. 내연기관 시스템은 비 에너지(specific energy)가 높아 체공시간이 길지만, 순간적인 에너지를 소비하는 운동에는 적합하지 않다. 이러한 두 시스템의 단점을 보완하기 위해 하이브리드 동력시스템에 대한 연구와 개발이 진행되고 있다⁽²⁾.

본 논문은 동력시스템이 이원화된 대형 농업용 병렬-하이브리드 시스템 드론의 동력 계통 설계 기법을 제시하고자 한다.

본론

1. 에너지 흐름

본 논문에서는 농업용 대형드론과제에서 현재까지 구성한 시스템을 참고하여 Fig. 1과 같은 에너지 흐름을 구성하였다.

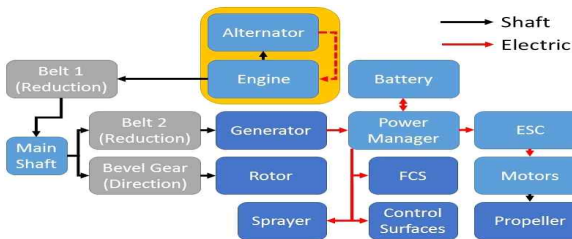


Fig. 1. Energy flow

엔진에서 발생된 동력이 벨트1을 통해 주축으로 전달되고 주축에서 일부 동력은 베벨기어박스를 통해 주로터로 전달되며 나머지 동력은 다시 벨트2를 통해 발전기로 전달된다.

발전기에서 발생한 전기에너지는 전력관리장치

(PMS)를 통해 비행제어컴퓨터, 조종면(작동기), 농약 분사기, 모터속도제어장치(ESC)로 배분된다. 2개의 주로터가 기체 중량의 대부분을 담당하고, 4개의 ESC와 모터를 이용해서 일반 드론같이 자세 제어를 하게 된다. 본 연구에 사용된 무인기의 제원과 각 구동 및 전력계의 효율은 Table 1에 요약하였다.

Table 1. Design parameters and efficiencies

기체 질량		150 kg	보조 로터	단일 추력, m_p		7 kg
주 로터	지름, D_r	1.5 m		지름, D_p	27.5 in	
	추력계수 c_{Tr}	0.092		추력계수, c_{Tp}	0.0965	
	동력계수 c_{Pr}	0.027		동력계수, c_{Pp}	0.0263	
ESC 효율, η_{ESC}		0.9	벨트 효율, $\eta_{belt1,2}$		0.95	
PMS 효율, η_{PMS}		0.9	기어 효율, η_{bevel}		0.95	

2. 전력부

동력을 최적화하기 위해 Table 1의 설계조건에 맞추어 역설계하였다. 보조 로터 1개당 7kg의 중량을 담당하므로, 식 (1),(2)를 사용하여 프로펠러의 필요회전수와 토크를 계산한다⁽³⁾.

$$n_p = \sqrt{T_p / c_{Tp} \rho D_p^4} \tag{1}$$

$$Q_p = P_p / \omega_p = c_{Pp} \rho n_p^3 D_p^5 / \omega_p \tag{2}$$

Table 2. Motor and generator constants

k_t	0.0707 Nm/A	I_0	0.5 A
R_m	0.057 Ω	k_1	0.000001
		k_2	0.0000001

Table 2는 KDE7215XF-135 모터의 사양이다. Q_f 는 마찰로 손실되는 토크이고 식 (3)과 같이 2차식으로 모델링하였다.

$$Q_f = k_0 + k_1 \omega + k_2 \omega^2 \tag{3}$$

프로펠러에서 필요한 토크는 모터에서 발생하는 토크와 같다. 식 (4)을 적용하여 모터의 전류를 구한다.

$$Q_p = Q_m = k_t I_m - Q_f \quad (4)$$

앞서 구한 전류로 식 (5)을 통해 요구전압을 구한다.

$$V_m = I_m R_m + k_t \omega_m \quad (5)$$

지금까지 구한 모터의 전압과 전류, 토크와 각속도를 이용해 식 (6)으로 91%의 모터효율을 구할 수 있다⁽⁴⁾.

$$\eta_m = Q_m \omega_m / V_m I_m \quad (6)$$

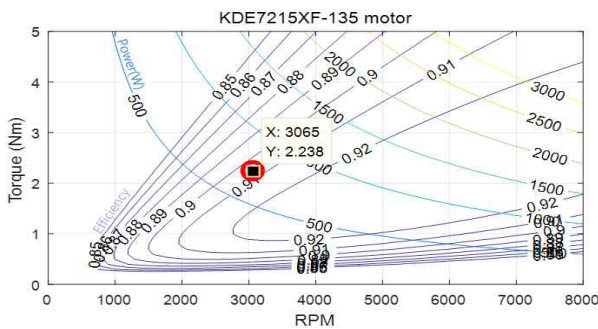


Fig. 2. Motor operating point

모터의 필요전력과 Table 3의 다른 장치들의 필요전력을 합하고, 효율을 고려하여 발전기의 출력전력을 구한다. 각 장치들은 병렬로 이루어져 있기 때문에 전압은 같으므로 식 (7)과 같이 출력전류를 알 수 있다.

Table 3. Electronic devices required power

P_{sp}	100 W	P_{fcs}	200 W	P_{cs}	50 W
----------	-------	-----------	-------	----------	------

$$I_g = (I_m N_p / \eta_{ESC} + I_{sp} + I_{fcs} + I_{cs}) / \eta_{PMS} \quad (7)$$

발전기의 출력 전압과 전류를 식 (3~5)에 적용하면 발전기에서 요구되는 각속도와 토크를 알 수 있다. 따라서 식 (8)과 같은 발전기의 효율을 구한다.

$$\eta_g = (N_p Q_m \omega_m + P_{sp} + P_{fc} + P_{cs}) / Q_g \omega_g \quad (8)$$

3. 동력부

주 로터 1개의 담당 추력은 식 (9)과 같이 나타낸다.

$$T_r = (m - 4T_p)g/2 \quad (9)$$

식 (1, 2)을 사용하여, 로터의 회전수와 토크를 알 수 있고, 엔진의 RPM을 임의로 가정했을 때, 식 (10)과 같은 기어비를 구한다.

$$G_r = RPM_e / RPM_r, G_g = RPM_e / RPM_g \quad (10)$$

각 벨트와 베벨기어의 효율을 적용하면 식 (11)을 사용하여, 엔진의 토크를 계산할 수 있다.

$$Q_e = N_r Q_r / G_r \eta_{belt1} \eta_{bevel} + Q_g / G_g \eta_{belt1} \eta_{belt2} \quad (11)$$

4. 효율

앞서 구한 토크와 RPM으로 엔진의 연료소비율을 구할 수 있다. 비 연료소비율은 50마력급 로터리 엔진 실험을 바탕으로 추정하였다. 엔진의 RPM이 5700이라 가정했을 때, 37.88N·m의 토크와 약 0.14kg/ps·h의 비 연료소모율을 구할 수 있다.

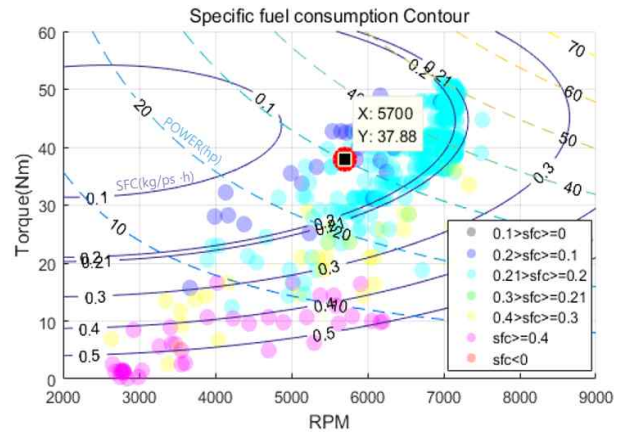


Fig. 3. Engine Dynamo Data

결론

농업용 대형드론의 동력시스템을 구성하고, 동력을 최적화 하여, 엔진의 비 연료소모율을 구했다.

향후 엔진 근사식을 통해 최적의 엔진RPM을 찾을 것이고, 약재분사와 연료소모로 인한 무게의 변화를 고려한 최적화를 시행할 것이다.

후기

본 연구는 산업통산자원부의 산업 융합 기술 산업 핵심 기술 개발사업의 일환으로 수행하였음. [과제고유번호: 10060314, 전기전자제어 시스템 개발]

참고문헌

- 1) Jung, Y. W., Kang, W. G., and Ryu, J. H., "Study for Market Forecast of Unmanned Vehicle", *KSME 2015 Annual Meeting*, 2015, pp. 1772-1777
- 2) Kim, K. B. and Lee, B. H., "A Conceptual Study on the Hybrid Power System for Compound Rotary-wing UAV", *2016 KSPE Spring Conference*, 2016, pp. 859-862
- 3) Brandt, J. B. and Selig, M. S., "Propeller Performance Data at Low Reynolds Numbers", *49th AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2011, AIAA 2011-1255
- 4) Krishnan, R., *Electric Motor Drives Modeling, Analysis, and Control*, Pearson Education, New Jersey, 2001, pp. 18-35