

## 후류 효과로 인한 동축 로터의 성능 감소에 대한 실험적 모델

안형주<sup>1\*</sup>, 홍경우<sup>1</sup>, 박준우<sup>1</sup>, 이동우<sup>1</sup>, 장광우<sup>1</sup>, 방효충<sup>1</sup>

한국과학기술원<sup>1</sup>

## Experimental Model of Coaxial Rotor Loss of Effectiveness by Wake Effect

Hyungjoo Ahn<sup>1\*</sup>, Kyungwoo Hong<sup>1</sup>, Junwoo Park<sup>1</sup>, Dongwoo Lee<sup>1</sup>, Kwangwoo Jang<sup>1</sup>, Hyochoong Bang<sup>1</sup>

**Key Words** : Coaxial Rotor(동축 로터), Experiment based modeling(실험 기반 모델링), Loss of Actuator Effectiveness(액추에이터 성능 감소)

### 서론

최근 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 및 도심 항공 모빌리티(Urban Aerial Mobility, UAM)의 연구 동향 중 플랫폼의 크기가 커짐에 따라 승객 혹은 화물 등 무거운 페이로드를 탑재하는 것이 필수인 플랫폼에 대한 개발 및 연구가 있다. 일반적인 작은 크기의 멀티로터와는 다르게 큰 크기의 멀티로터는 한정된 공간에 대해 효율적인 프로펠러 배치를 함으로 써 기체의 크기는 줄이면서도 프로펠러 효율은 높여야 하는 문제가 있다. 이러한 문제의 대표적인 해결책으로는 동축 형태의 로터를 사용하여 두 개의 로터를 하나의 축에 쌓아 올리는 방식을 채택한다.

하지만 이러한 동축 로터의 경우 상단의 프로펠러 후류 효과로 인한 하단 프로펠러의 성능을 저하시킨다. 이러한 효율 감소는 주어진 모델을 기반으로 설계된 제어기에 대해 불확실성을 야기함으로써 제어기 입력 명령에 대해 예기치 못한 제어 응답을 만들어낸다.

본 논문에서는 주어진 동축 로터에 대하여 ESC(전자 변속기, Electric Speed Controller)에 인가된 PWM(Pulse Width Modulation) 신호에 대한 토크 및 추력의 감소비를 추정한다. 상단 모터의 고정된 PWM 신호 값에 대해 하단 모터의 PWM 신호 값을 변화하며 실험을 진행하고, 상단 및 하단 모터의 여러 PWM 신호 조합에 대한 성능 감소비를 추정한다.

### 실험 설계 및 실험값 도출

#### 실험 과정 및 테스트 벤치 구성

실험은 우선 단일 로터에 대한 모터 속도, 추력, 토크 값을 구하여 일반적인 형태의 로터에 대한 성능치를 측정하고, 이에 기반하여 후류의 영향을 받는 하단 로터에 대해 PWM 값을 변화시키면서 성능의 변화를 관찰하였다. 상단 로터의 추력은 총 8단계로 나누어 고정해 놓은 상태에서, 각각의 상단 로터 PWM 값에 대해 하단 로터의 PWM 값을 0%~100%에 대해 10% 간격으로 총 10개의 구간에 대해 실험값을 도출했다. 실험값 측정을 위해 “RC benchmark series 1780”을 사용했으며, 이에 사용된 모터 및 ESC는 “T-Motor U15II KV80” 및 “T-Motor Flame 200A 14S”이다.

### 실험값 도출

앞서 서술한 테스트 벤치를 활용하여 모터의 회전 각속도, 토크, 추력 데이터가 도출되었다. 본 실험에서 사용된 PWM 신호 값, 모터 속도, 토크, 추력의 단위는 각각 %, RPM, N, Nm이다. 우선 단일 로터에 대한 실험 데이터를 측정하였으며, 이는 각각 PWM 신호 값에 대한 모터의 속도 및 추력과 토크 값이다. PWM 신호 값은 각각 0%~100%에 대해 12.5% 간격으로 나누어 총 8개의 단계로 나누었다. 실험의 결과는 아래와 같다.

Table 1. PWM level to motor speed with single rotor configuration

PWM[%]	12.5	25.0	37.5	50.0	62.5	75.0	87.5	100.0
Motor speed [RPM]	892	1472	2005	2585	3167	3726	4262	4750

Table 2. Motor speed to thrust and torque with single rotor configuration

Motor speed [RPM]	892	1472	2005	2585	3167	3726	4262	4750
Thrust [N]	5.913	18.22	35.10	59.42	90.34	126.3	167.3	210.3
Torque [Nm]	0.335	0.655	1.223	2.032	3.073	4.290	5.664	7.118

또한, 동축 로터에 대한 PWM 값에 따른 추력 및 토크 값의 결과는 아래와 같다.

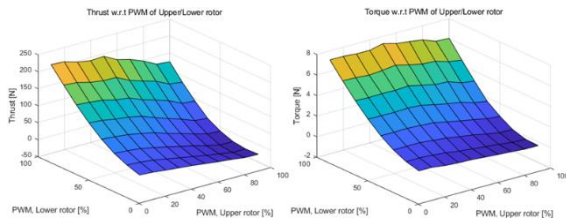


Fig. 1. Thrust and torque of coaxial rotor for given PWM signal

## 액추에이터 성능 감소 분석

### 추력 및 토크 명목치 추정

동축 로터에 대한 토크/추력 명목치는 추정된 단일 로터값에 기반하여 계산되었다. 우선 PWM 신호 대비 모터 속도는 1차 곡선 근사를 통해 예측되었으며, 근사에 사용된 곡선의 방정식은 아래와 같다.

$$\omega_{RPM}(s_{PWM}) = p_{RPM}s_{PWM} + q_{RPM}, s_{PWM} \in [0, 100] \quad (1)$$

이 때  $\omega_{RPM}$ ,  $s_{PWM}$ ,  $p_{RPM}$ ,  $q_{RPM}$ 는 각각 모터 속도, PWM 신호 값, 1차 곡선에 대한 파라미터이다. 특히, 각 상수의 값은  $p_{RPM} = 5.5802$  및  $q_{RPM} = -0.0055$ 이다. 또한, 추력/토크는 각각 모터의 회전 속도 제곱에 비례하므로 아래와 같이 2차 곡선의 형태로 근사하였다.

$$T_N(\omega_{RPM}) \sim p_T \omega_{RPM}^2 + q_T \omega_{RPM} + r_T \quad (2)$$

$$\tau_N(\omega_{RPM}) \sim p_\tau \omega_{RPM}^2 + q_\tau \omega_{RPM} + r_\tau \quad (3)$$

여기서  $T_N$ 와  $\tau_N$ 는 각각 추력 및 토크의 명목치이며,  $p_T$ ,  $q_T$ ,  $r_T$ ,  $p_\tau$ ,  $q_\tau$ ,  $r_\tau$ 는 2차 근사에 사용된 파라미터이고 그 값은 아래와 같다.

Table 3. Parameter for 2<sup>nd</sup> order curve fitting

파라미터	$p_T$	$q_T$	$r_T$	$p_\tau$	$q_\tau$	$r_\tau$
값	1.01e-5	-0.0041	2.1176	3.53e-7	-2.3e-4	0.2502

위의 식 (1) ~ (3)을 통하여 추력 및 토크 명목치에 대한 식은 아래와 같이 도출할 수 있다.

$$T_N(s_{PWM}) \sim p_T q_{RPM}^2 s_{PWM}^2 + p_{RPM} (2 p_T q_{RPM} + q_T) s_{PWM} + (q_{RPM}^2 + q_T q_{RPM} + r_T) \quad (4)$$

$$\tau_N(s_{PWM}) \sim p_\tau p_{RPM}^2 s_{PWM}^2 + p_{RPM} (2 p_\tau q_{RPM} + q_\tau) s_{PWM} + (q_{RPM}^2 + q_\tau q_{RPM} + r_\tau) \quad (5)$$

### 액추에이터 성능 감소 추정

액추에이터 성능 감소는 단일 로터 추력의 실험값에 대해 동축 로터 중 하단의 로터에 대한 추력 및 토크의 명목치에 대한 비율로 계산하였으며, 이는 아래의 식과 같다.

$$k_{exp,T}(l_{PWM,L}, l_{PWM,U}) = T_{exp}(l_{PWM,L}, l_{PWM,U}) / T_N(l_{PWM,L}) \quad (6)$$

$$k_{exp,\tau}(l_{PWM,L}, l_{PWM,U}) = \tau_{exp}(l_{PWM,L}, l_{PWM,U}) / \tau_N(l_{PWM,L}) \quad (7)$$

이 때, 실험에 기반한 추력 및 토크의 값이 불연속적이므로 이를 다시 3차 곡면 근사를 통해 주어진 상단 및 하단 모터의 PWM 값에 대한 성능 감소비 식을 도출하였다. 이에 따른 3차 근사 곡면과 실제 실험 값의 비교는 아래와 같다.

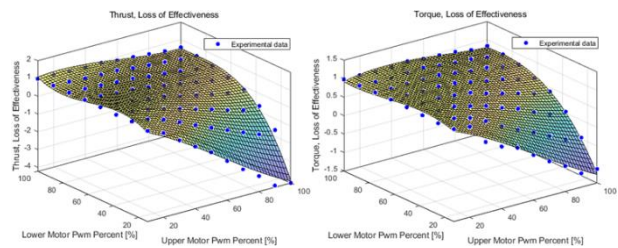


Fig. 2. Comparison between estimated loss of effectiveness and experimental data

## 결론

본 논문에서는 실험에 기반한 동축 로터의 PWM 인가 신호 대비 성능 감소비를 추정하였다. 실제 테스트벤치 구성을 통해 실험값을 도출하였으며, 이를 기반으로 추력 및 토크에 대한 명목치를 계산하였다. 명목치 대비 실험값을 통해 확인된 감소비를 계산하였으며, 이를 3차 곡면을 통해 근사하여 성능 감소비를 모델링하였다. 추후, 이를 통해 동축 반전 로터를 사용한 기체에 대한 보다 정확한 모델링이 가능할 것으로 생각되며, 정확한 모델기반 제어를 적용할 수 있을 것으로 보인다.

## 참고문헌

- 1) Adam. B., Stanislaw. G., Przemyslaw. G., and Wojciech. G., "Performance of Coaxial Propulsion in Design of Multirotor UAVs", *International Conference on Automation*, Springer, Cham, 2016. P.523-531
- 2) Yoon. S., Chan. W. M., and Pulliam. T. H., "Computations of torque-balanced coaxial rotor flows", *55<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting*, 2017. P. 0052