

전산유체역학을 통한 PAV의 로터 블레이드 축간거리에 따른 호버링 성능 변화 연구

윤재현*, 노우승**, 도재혁**,#

*에이드 컴퍼니, **경상국립대학교 기계소재융합공학부

A Study on Hovering Performance of Personal Air Vehicle According to Distance between Rotor Blade Axis via Computational Fluid Dynamics

Jaehyun Yoon*, Wooseung Noh**, Jaehyeok Doh**#

*AID Company, **School of Mechanical and Material Convergence Eng., Gyeongsang Nat'l Univ.
(Received 25 February 2022; received in revised form 17 March 2022; accepted 11 April 2022)

ABSTRACT

In this study, the conceptual design and performance evaluation of a personal air vehicle (PAV) is presented, which is a potential futuristic individual transportation. The blade element theory (BET) is employed to compute a rotational velocity. A computational fluid dynamics (CFD) simulation is performed to investigate the difference in the thrust performance in the rotor axis distance of a quad-copter PAV in hovering. Modal analysis is performed to create a Campbell diagram to investigate critical speed. Consequently, a quad-copter PAV changes the aerodynamics thrust and critical velocity according to the rotor axis distance.

Keywords : Personal Air Vehicle(개인용 항공기), Blade Element Theory(깃 요소 이론), Computational Fluid Dynamics Simulation(전산유체해석), Hovering(제자리 비행), Campbell Diagram(캠벨 다이어그램)

-기호설명-

T	: 로터 블레이드 추력(N)	c	: 시위길이(m)
b	: 로터 블레이드 개수	C_L	: 양력계수
ρ	: 공기 밀도(Kg/m ³)	Ω	: 회전 각속도(RPM)
r	: 로터 블레이드 임의의 위치 길이(m)	v_i	: 유도 속도
R	: 로터 블레이드 길이(m)	Φ	: 유도 각도
V_r	: 로터 블레이드 임의의 위치의 속도	θ	: 피치 각(Deg.)
		a	: 받음각(Deg.)
		M	: 질량행렬
		K	: 강성행렬
		ω	: 고유진동수(rad/s)

Corresponding Author : jdoh@gnu.ac.kr

Tel: +82-55-772-3314, Fax: +82-55-772-3319

1. 서 론

자동차 보유 대수의 급격한 증가로 인해 오늘날 지상 교통수단은 포화상태에 이르렀고 시간이 지남에 따라 교통체증이나 환경문제로 인한 부작용 및 경제적 손실이 증가하고 있다.^[1] 이를 대안 하기 위해 새로운 교통수단 및 체계의 필요성이 증대하고 있으며 이에 따른 육상 도로망과 항공 도로망을 융합한 신개념의 교통수단으로 개인용 항공기(Personal air vehicle, PAV)가 주목되고 있다.^[2]

선진국에선 향후 자동차 시장의 일부 중 PAV가 대체될 것으로 예상하고 PAV 관련 연구가 활발히 진행되고 있으며, 최근에는 상용화가 가능한 제품 개발 사례도 보고되고 있다.

Kim 등^[3]은 최대중량 변화에 따른 정지 비행 가능 시간을 추정하기 위해 배터리의 중량을 고정하고 Actuator disc 해석과 전자유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 해석을 병행 수행하여 최대 이륙 중량급 PAV에 사용될 블레이드의 성능해석을 하였으며 Yun 등^[4]은 PAV에 쓰이는 전기추진 시스템에 관해서 기술하고 동력 시스템에 대한 분석, 무게 산정을 통하여 PAV 추진시스템의 전기추진시스템을 연구하였다.

본 연구에서는 회전익 항공기인 멀티콥터 형태의 PAV를 대상으로, 로터 축간거리의 변화에 따른 추력 성능변화와 위험속도 변화를 연구하였다. 해석을 수행할 PAV 모델을 선정 후 3차원 CAD 소프트웨어인 Creo/Pro-Engineering을 이용하여 쿼드콥터 형상을 모델링 하였으며, CAE 소프트웨어인 ANSYS FLUENT R14.5^[5]를 사용하여 추력 값을 계산하였으며, 고유진동 해석을 통해 위험속도를 계산하여 축간거리의 변화에 따른 추력 성능과 위험속도를 분석하였다.

2. PAV 모델

2.1 PAV의 분류

PAV는 운용기준에 따라 항공기와 동일한 방법으로 운용하는 단일모드, 지상과 항공기의 두 가지 모드로 운용이 가능한 복합모드로 나뉜다.

또한 이착륙 방식에 따라 활주로를 이용하는

Conventional take-off and landing (CTOL), Short take-off and landing (STOL)과 추진 부분을 회전 또는 수직으로 움직임으로써 활주로가 매우 짧거나 활주로가 없는 환경에서도 운용이 가능한 Vertical take-off and landing (VTOL), Super short take-off and landing (SSTOL)이 있다.

본 연구에서는 사람이 탑승 가능한 PAV를 대상으로 하였으며, 단일모드 VTOL 방식을 구현하기 위해 멀티콥터 방식을 채택하였다.^[6]

2.2 PAV 모델

멀티콥터(Multi-copter)의 종류로 3개의 로터를 가지며 동체 좌우 및 꼬리 쪽에 로터를 달고 있는 트라이 콥터, 4개의 로터를 가지며 가장 많이 사용되는 쿼드 콥터(Quad-copter), 쿼드 콥터에 트라이 콥터(Tri-copter)가 가진 꼬리 로터를 추가한 구조의 펜타 콥터(Penta-copter) 등이 있다.

본 연구에서는 로터의 축간거리 변화에 따른 멀티콥터의 공력성능분석, 공진 회피 설계를 하고자 하였으며, 대상은 로터가 4개로 구성된 쿼드콥터이다. 쿼드콥터의 로터는 마주보는 두 개의 로터가 시계방향, 나머지 두 개는 반시계 방향으로 회전함으로써 비행 제어가 쉽다. 3차원 CAD 소프트웨어를 이용하여 쿼드콥터 모델 형상을 Fig. 1에 나타내었으며, 전체 형상을 대상으로 유동 해석 및 1/4 형상에 대해 고유진동수 해석을 수행하였다.

본 연구에서 고려한 로터의 축간거리는 4가지이며 Table 1에 나타내었다. 여기서 Case A는 로터 축간의 물리적 간섭이 생기지 않기 위한 최소거리(L=1.11218m)이며, Case B는 초기형상의 축간거리인 L=1.88643m, Case C는 Case B의 75% 축간거리인 L=1.41482m, Case D는 Case B의 125% 축간거리인 L=2.35804m의 경우이다. 모델에 사용된 로터 블레이드 단면은 형상이 시위 선 기준 위, 아래 대칭으로 이루어진 NACA0012를 선정하였으며, 로터 블레이드 형상에 적용되는 치수 및 형상 관련 데이터를 Table 2에 나타내었다. 본 연구에서는 쿼드콥터의 제자리 비행에 필요한 962 RPM의 회전속도를 갖 요소 이론(Blade element theory, BET) 사용하여 산출하였으며, 오차를 고려하여 1,000RPM (104.72rad/s)으로 설정하여 CFD해석을 진행하였다.

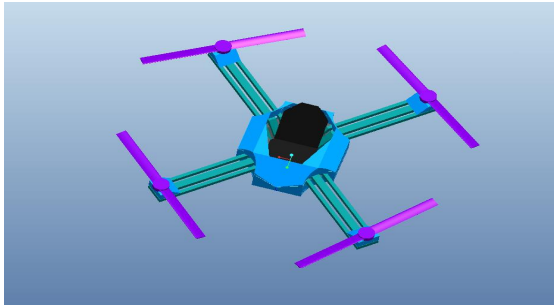


Fig. 1 PAV CAD Model

Table 1 Axis distance between rotor blades

Rotor axis distance	Value	Unit
Case A	1.11218	m
Case B	1.88643	
Case C	1.41482	
Case D	2.35804	

Table 2 Specification of rotor blade

Parameter	Value	Unit
Airfoil	NACA0012	-
# of blades	2	-
Radius	$R=1$	m
Twist angle	$\theta=10$	Deg.
Chord length	$C=0.2$	m
Rotational velocity	1,000	RPM
Body material	CFRP	-
# of rotors	4	-

3. 유동 해석

3.1 깃 요소 이론

본 연구는 로터 축간거리 변화에 따른 추력의 값을 비교하기 위해 기준 거리에서의 추력 값을 구할 수 있는 깃 요소 이론을 이용하였으며 식 (1)에 나타내었다.

$$T = \frac{1}{2} b \rho \int_r^R V_r^2 c C_L dr \quad (1)$$

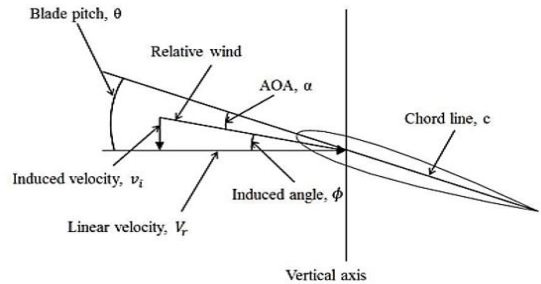


Fig. 2 Sectional of rotor blade airfoil^[7]

로터 블레이드 개수는 2개로 정해져 있고, 비압축성 유체로 밀도의 변화가 없다고 가정하면 두 항은 적분기호 밖으로 나오게 된다. 양력계수 및 회전속도, 시위 길이는 로터 블레이드의 길이에 따라 변화하므로 적분을 통해 계산하였다.

양력계수는 풍동 실험이나 전산 해석을 통해 얻을 수 있으나 본 연구에서는 에어포일 이론을 이용하여 값을 구하였으며 식 (2)에 나타내었다.

$$C_L = 2\pi\alpha \quad (2)$$

식 (2)의 받음각은 로터 블레이드의 속도, 유도 속도에 따라 결정되며 로터 블레이드 피치 각에 따라 유도 각도는 결정된다.

로터 블레이드 단면에서 작용하는 유동 성분은 Fig. 2에서 보여준다. 로터 블레이드 단면은 초기 받음각이 주어지나, 로터 블레이드가 회전하면서 공기가 유입되어 유도 속도가 발생한다. 유도 속도와 로터의 회전 각속도를 통해 유도 각을 구하였고, 로터 블레이드의 유도 각과 피치 각 차이로 인해 비틀림을 갖는 로터 블레이드의 길이 방향에 따라 받음각을 계산하였으며 식 (3)~(6)과 같이 관계식을 나타내었다.

$$V_r = \Omega r \quad (3)$$

$$v_i = \sqrt{\frac{T}{2\rho A}} \quad (4)$$

$$\phi = \tan^{-1} \frac{v_i}{V} \quad (5)$$

$$\alpha = \theta - \phi \quad (6)$$

따라서 로터 블레이드 추력 식을 정리해서 나타내면 아래의 식 (7)과 같다.

$$T = b\rho\pi \int_r^R V_r^2 (\theta - \tan^{-1} \frac{V_z}{V_r}) dr \quad (7)$$

제자리 비행 시, PAV의 중량 2,000kg을 들어 올리는데 필요한 추력은 1,962N이며, 로터 블레이드의 형상 치수를 식(7)에 대입해 회전속도를 역산하여 962RPM을 산출하였다. 이를 기반으로 수치오차를 고려해 1,000RPM으로 설정하여 CFD 해석을 수행하였다.

3.2 전산유체해석

깃 요소 이론 계산 값과 전산유체해석 코드로 얻어진 값을 이용하여 차이를 비교하였으며 추력의 값을 얻기 위해 상용 패키지 ANSYS FLUENT R14.5를 사용하여 전산유체해석을 수행하였다. 로터 블레이드와 프레임에 대해 해석을 진행하였으며 경계조건은 Fig. 3에 표현하였다. 로터 블레이드와 프레임은 강제 형상을 정의하는 Wall 조건을 주었고, 회전하는 로터의 비정상상태 해석을 위한 Interface 조건을 부여하여 원통 형태의 부분에 로터 블레이드의 회전 운동을 묘사하였다. 외각의 사각형 부분은 유동 장으로 공기가 들어오는 곳에 Inlet 조건을 부여하였고, 나가는 다섯 개의 면에는 Outlet 조건을 부여하였다.

전산유체해석 계산을 위한 CFD격자 구성을 Fig. 4에 나타내었으며, 로터 블레이드의 회전 운동을 하는 영역과 외부 유체 영역에서 Wall에 해당하는 부분을 제하고 격자를 생성하였다. 해석범위의 노드는 Table 3과 같다.

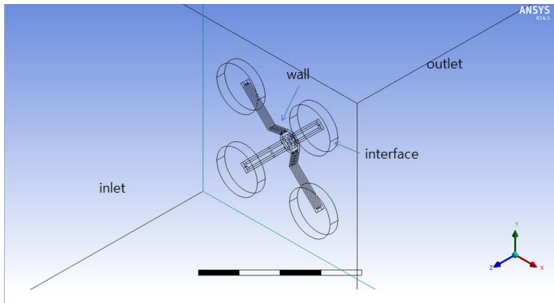


Fig. 3 Boundary condition

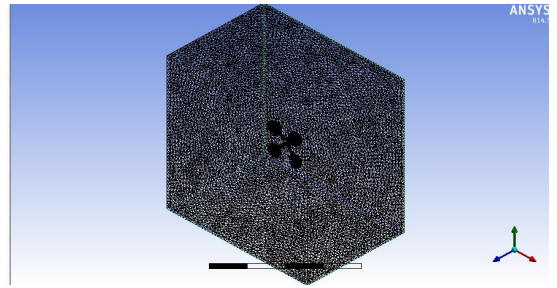


Fig. 4 Mesh generation

Table 3 Mesh generation for CFD analysis

Rotor axis distance	No. of Nodes	No. of Elements
Case A	87,666	449,602
Case B	90,866	469,007
Case C	88,845	458,506
Case D	92,396	477,126

3.3 전산유체해석 결과

로터 축간거리를 변화시켜가며 추력을 구하기에 앞서 하나의 로터를 이용하여 유체해석을 진행하였다. 전산유체해석을 마친 결과 단일로터의 추력은 380.5725N으로 구할 수 있었다. 이를 네 배 하면 1,522.29N으로, 깃 요소 이론에서 계산된 1,962N과 22.4%의 오차가 발생하였다. 이는 축간거리를 배제하여 나온 결과로 보이며, 이와 같은 큰 오차가 발생한 이유는 로터 블레이드 끝단에서 발생한 와류의 영향으로 판단된다.

본 전산유체해석의 목적은 로터 축간거리 변화에 따른 추력 값의 변화이기 때문에, 로터 간의 블레이드 끝단에서 발생하는 와류의 영향을 받지 않는 단일로터의 추력 계산 값의 4배에 해당하는 1,522.29N과 비교하였다. 이를 통해 로터 축 거리가 변화됨에 따라 추력 값이 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 로터에 의해 발생하는 유체의 속도를 Fig. 5에 나타내었으며, 축간거리 변화에 따른 추력 변화를 Table 4와 Fig. 6에 나타내었다.

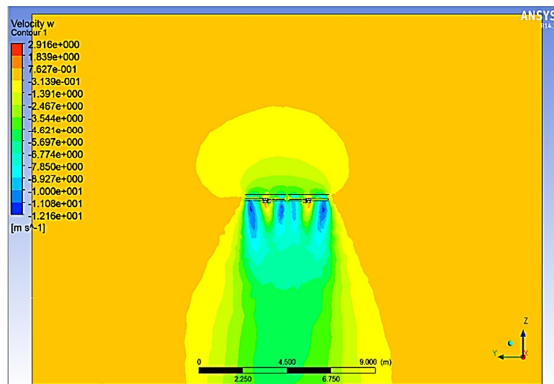
추력은 최단 거리(Case A)에서 최대값을 나타내고 축간거리가 길어짐에 따라 급격히 감소했다가 (Case B) 서서히 증가하는 추세를 보인다. 주변 물

체(프레임)이 추력에 주는 영향은 무시할 수 있으므로 이는 로터에 의해 생성된 와류, 유선이 서로 간섭현상을 보이기 때문이라고 판단된다.^[8] 따라서, Case A에서는 와류가 생성되지 않을 정도로 로터가 밀접해 단일로터보다 성능이 뛰어난 것으로 보이고, Case B부터 Case D까지는 축간거리가 멀어지면서 와류의 영향에서 벗어나기 때문에 단일로터의 추력 값으로 수렴한다고 판단된다^[9].

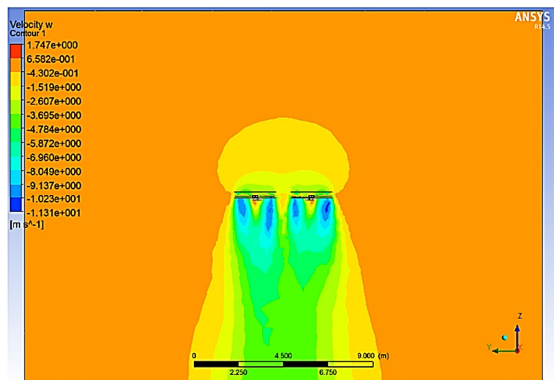
4. PAV의 고유진동 해석

4.1 유한요소법을 이용한 고유진동해석

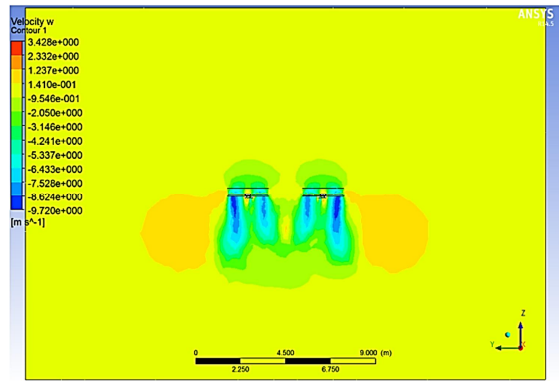
유한요소법은 전체 구조물을 유한개의 요소로 나눠 각 요소의 변위를 미지수로 하는 연립방정식을 구하고 이를 조합하여 전체 구조물의 결과 값을 얻어내는 것을 뜻한다.



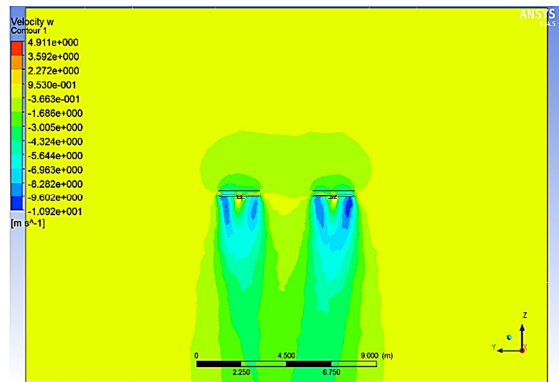
(a) Case A



(b) Case B



(c) Case C



(d) Case D

Fig. 5 Velocity distribution ($\Omega=1,000\text{RPM}$)

Table 4 Thrust of four rotor blades by CFD ($\Omega=1,000\text{RPM}$)

Rotor axis distance	Thrust (N)	Error (%) (Ref. 1,522N)
Case A	1538.844	-1.09
Case B	1362.295	10.51
Case C	1391.781	8.57
Case D	1482.273	2.63

유한요소법의 두 절점에서 요소의 경계조건을 이용하여 강성행렬(\bar{K})과 질량행렬(\bar{M})을 구할 수 있고 이를 통해 시스템의 고유진동수를 구할 수 있다.^[10]

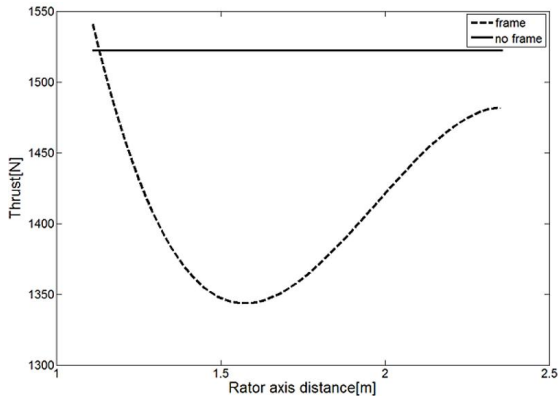


Fig. 6 The trend of thrust according to rotor axis distance ($\Omega=1,000\text{RPM}$)

강성행렬과 질량행렬을 이용해서 운동방정식을 세우면,

$$M\ddot{\theta} + K\dot{\theta} = 0 \quad (8)$$

이 되며,

$$\theta = \bar{\theta} e^{j\omega t} \quad (9)$$

라 가정하고 식 (8)에 대입하면,

$$e^{j\omega t} (K - \omega^2 M) \bar{\theta} = 0 \quad (10)$$

이 된다. 이 식에서 자명해(Trivial solution)를 갖기 위해서는 행렬식이 0 이 되어야 하므로,

$$|K - \omega^2 M| = 0 \quad (11)$$

을 만족하는 ω 가 시스템의 고유진동수가 된다.

4.2 고유진동 해석 결과

물체의 고유진동수와 회전주파수가 일치하게 되면, 공진현상이 발생하고 진동이 더욱 커져 물체의 탄성한도를 넘으면 파괴된다. 이와 같이 물체의 고유진동수와 일치하는 축의 회전속도를 축의 위험속도(Critical velocity)라고 한다.

위험속도의 값을 얻기 위해서 CAE 소프트웨어인 ANSYS-Modal을 사용하여 계산하였다. Modal 해석을 위한 조건은 Fig. 7에 나타내었으며, 로터 블레이드 측은 Joint (Bushing)에 의해 지지 되고, 로터는 블레이드 측에 의해 Cylindrical support 된다. 변

화하는 로터 축간거리에 대한 캠벨 다이어그램 (Campbell diagram)을 구하기 위해 80rad/s부터 170rad/s까지 30rad/s의 간격의 조건으로 위험속도를 측정하였다^[11].

Modal 해석을 통해 각 고유진동수 별 변형 정도와 캠벨 다이어그램을 구할 수 있었으며, 로터 축간거리가 변화됨에 따라 위험속도가 다르게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. PAV의 캠벨 다이어그램을 Fig. 8에 나타내었으며 각 Case의 위험속도는

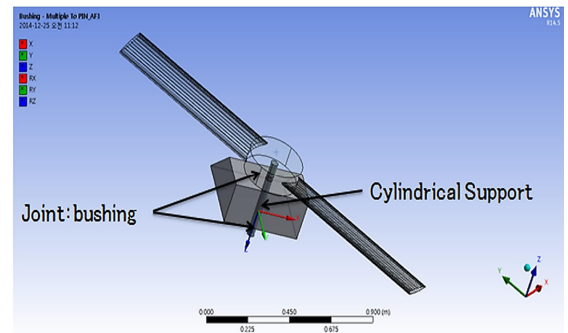
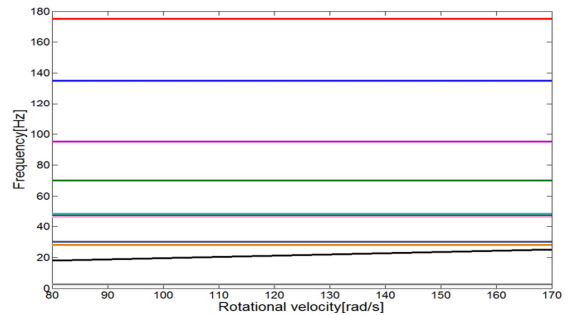
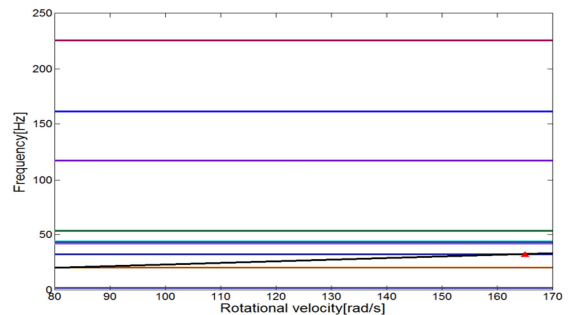


Fig. 7 Boundary conditions of PAV for modal analysis



(a) Case A



(b) Case B

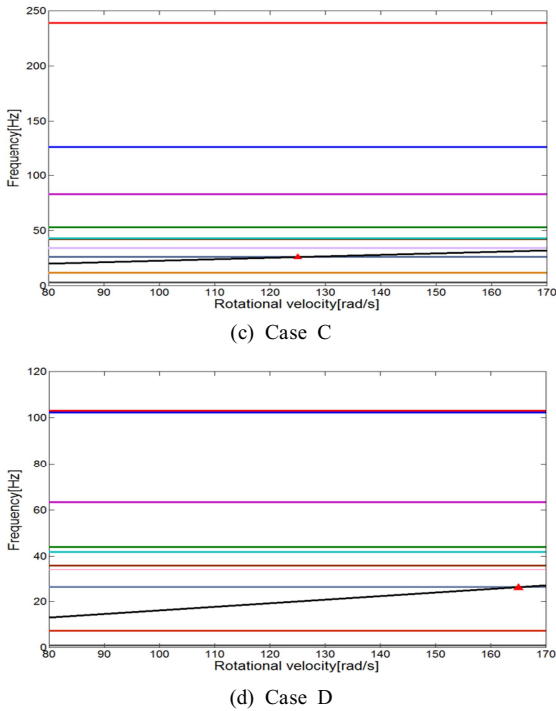


Fig. 8 Campbell diagram according to rotational velocity of rotor blades

2차, 3차 모드에서 발생하는 것을 알 수 있다. 위험속도 분포를 나타낸 Fig. 9를 보면 Case A에서는 위험속도가 생기지 않고, 축간 길이가 멀어질수록 위험속도가 커지는 것을 볼 수 있다. 그러나 1차부터 5차까지의 위험속도 변화를 나타낸 Fig. 10에서 보면 각각의 고유진동수가 축간거리가 멀어짐에 따라 낮아짐을 볼 수 있는데 특히 2차 고유진동수의 변화가 거리에 대해 민감한 것으로 나타난다.

위험속도는 고유진동수와 회전주파수가 일치하는 지점의 속도이다. 회전주파수는 회전속도가 커짐에 따라서 증가하므로, 축간거리가 짧을수록 높은 회전속도를 얻을 수 있다.

본 연구에서는 회전 주파수 대역을 80rad/s에서 170rad/s까지 변화를 주어 해석하였고, Case A부터 Case C까지는 2차 고유진동수에서 위험속도를 얻었으며 Case D는 3차 고유진동수에서 위험속도를 얻었다. 낮은 차원의 고유진동수에서 위험속도를 얻는 것이 더 유리하고, 축간거리가 짧아질수록 고유진동수가

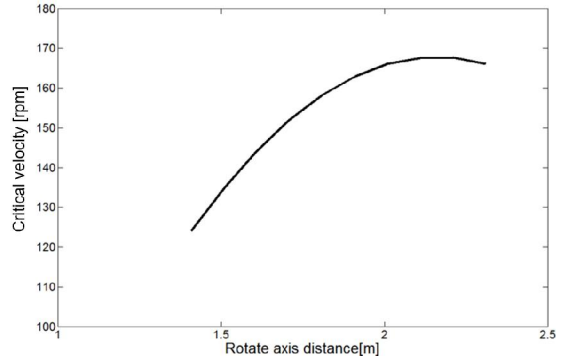


Fig. 9 Critical velocity with changed rotor axis distance

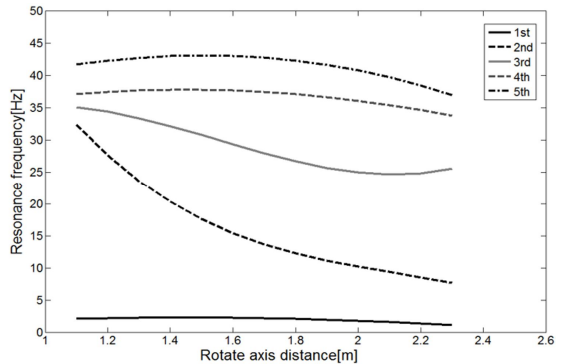


Fig. 10 The resonance frequency of from 1 to 5 order according to rotor axis distance

높아지기 때문에 공진 회피 측면에서는 축간거리가 짧을수록 좋다고 볼 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 로터가 4개인 쿼드콥터의 축간거리의 변화에 따른 추력 성능과 위험속도를 분석하였다. 4개의 로터의 성능 분석하기 전 로터 간 간섭현상을 배제하기 위해 1개의 로터에 대해 유동 해석을 수행하였으며, 4개 로터를 축간거리를 변화시켜 구한 추력을 1개의 로터에서 발생한 추력의 네 배와 비교하였다. 이를 통해 동일한 회전속도에서 축간거리가 로터가 맞닿을 정도로 짧으면 1개 로터보다 추력이 높았고, 축간거리가 멀어짐에 따라 1개 로터에서 발생한 추력과 낮은 값에서 수렴

함을 볼 수 있었다. 이는 로터 블레이드 끝단에서 발생한 와류가 로터 간의 간섭현상을 발생시키는데, 간격이 매우 좁을 때는 와류의 발생을 감소시켜 성능이 향상되고, 거리가 멀어지면서 와류가 발생하였다가 영향권에서 벗어나게 되기 때문에 판단된다.

1/4모델에서 수행한 고유진동수 해석 결과 형상의 고유진동수는 축간거리가 멀어짐에 따라 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 위험속도 측면에서 보면 고유진동수가 높아야 높은 회전진동수를 얻을 수 있으므로, 축간거리가 좁을수록 공진 측면에서 유리한 것으로 판단된다.

본 연구를 통해 쿼드콥터의 필요 성능 및 안전성을 구하고자 할 때, 로터 블레이드 축간거리의 변화로 최적 값을 구할 수 있었다. 향후 연구에서는 로터 블레이드 회전반경에 따른 와류 및 유동 흐름에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하고자 한다.

후기

이 논문은 2021년도 정부(교육부의) 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2021R111A3044394)

REFERENCES

- Sung, Y. H., Na, Y. J., Jeong, U. Y., Han, J. H., "The Status of research and development of PAV(Personal Air Vehicle)& Consideration of Korean version of PAV development", The Korean Society For Aeronautical And Space Science, Vol. 2, pp. 1343~1346, 2010.
- Moore, M. D., "Personal Air Vehicles: A Rural/Regional and Intra-Urban On-Demand Transportation System", AIAA Paper pp. 2003-2646, 2003.
- Kim, Y. T., Park, C. H., & Kim, H. Y., "Performance analysis of Coaxial Propeller for Multicopter Type PAV (Personal Air Vehicle)", Journal of Aerospace System Engineering, Vol. 13, No. 3, pp. 56-63, 2019.
- Yun, D. I., Huh, H. I., & Yang, S. S., Preliminary Analysis of Power Systems for 1-ton class Electric Powered PAV. Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers, Vol. 14, No. 6, pp. 1-8, 2010.
- ANSYS FLUENT R14.5, ANSYS, Canonsburg, U.S.A.
- Kim, K. T., Ahn, S. M., Lee, D. S., Yi, T. H., "Technical Development Trend and Analysis of Futuristic Personal Air Vehicle," Current Industrial and Technological Trends in Aerospace, Vol. 9, No. 1, pp. 64~76, 2011.
- Yun, J. H., Lee, J. S., Choi, H. Y., "CFD-based Thrust Analysis of Unmanned Aerial Vehicle in Hover Mode: Effect of Single Rotor Blade Shape," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol. 38, No. 5, pp. 513~520, 2014.
- Kang, H. J., Kim, S. H., "Aerodynamic Calculations of Flow Field Around a Whirl Tower Including Surrounding Structures", The Korean Society For Aeronautical And Space Science, pp. 680~684, 2011.
- Lee, D. J., Chung, I. J., Jun, J. H., "A Numerical Investigation of the Main Rotor Tip-vortex and Counter-rotating Vortex during Hovering Flight", Journal of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences, Vol. 41, No. 10, pp. 761~769, 2013.
- Park, J. W., Jeong, S. H., "Rotor dynamics analysis according to positions of components in high speed rotor", Proceedings of the Korean Society of Machine Tool Engineers Conference, pp. 381~386, 2008.
- Shin, S. C., "Analysis procedure and Reliability of ANSYS Rotor Dynamics", Cad&Graphics, Vol. 2009, No. 1, pp. 149~153, 2009.