



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(2), 111-118(2022)

DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.2.111>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

전기-기계식 구동기를 이용한 블레이드 피치 조종 시스템의 동역학 모델

진재현¹

Dynamic Models of Blade Pitch Control System Driven by Electro-Mechanical Actuator

Jaehyun Jin¹Dept. Aerospace Engineering/Center for Aerospace Engineering, Sunchon National University,
Suncheon, Jennam, Republic of Korea

ABSTRACT

An electro-mechanical actuator (EMA) is an actuator that combines an electric motor with a mechanical power transmission elements, and it is suitable for urban air mobility (UAM) in terms of design freedom and maintenance. In this paper, the author presents the research results of the EMA that controls the rotor blade pitch angle of UAM. The actuator is based on an inverted roller screw and controls the blade pitch angle through a two-bar linkage. The dynamic equations for the actuator alone and the blade pitching motion with actuator were derived. For the latter, the equivalent moment of inertia is variable depending on the link angle due to the two-bar linkage. The variations of the equivalent moments of inertia are analyzed and compared in terms of the nut motion and the blade pitch motion. For an example model, the variation of the equivalent moment of inertia of the former is smaller than the latter, so it is judged that the dynamic equations derived from the point of view of the nut motion is suitable for the controller design.

초 록

전기-기계식 구동기(EMA)는 전기 모터와 기계적 동력전달 요소를 결합한 것으로 설계 자유도와 유지보수 측면에서 도심 항공 모빌리티(UAM)에 적합하다. 본 논문에서는 UAM의 로터 블레이드 피치각을 조종하는 EMA에 대한 연구 결과를 제시한다. 구동기는 역구동형 롤러 스크류를 기반으로 하며, 2절 링크를 통하여 블레이드 피치각을 조종한다. 구동기만의 동역학과 이것을 포함한 블레이드 피치운동의 동역학 방정식을 유도하였다. 블레이드 피치 동역학 방정식의 경우 링크의 영향으로 등가 관성모멘트는 링크 각도에 따라 변한다. 너트 운동의 관점과 블레이드 피치 운동의 관점에서 등가 관성모멘트의 변동을 분석·비교하는 과정을 제시하였다. 사례로 선정된 모델의 경우에 전자의 등가 관성모멘트 변동이 후자에 비하여 작았으며, 그래서 너트 운동의 관점에서 유도한 모델이 제어기 설계에 적합하다고 판단한다.

Key Words : Electro-Mechanical Actuator(전기-기계식 구동기), Rotor Blade Pitch Angle Control (로터 블레이드 피치각 제어), Roller Screw Kinematics & Dynamics(롤러 스크류 운동역학)

† Received : September 8, 2021 Revised : December 7, 2021 Accepted : January 17, 2022

¹ Professor

¹ Corresponding author, E-mail : donworry@scnu.ac.kr, ORCID 0000-0001-7558-6331

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

Nomenclature

x, v_s	: 스크류 변위, 속도	v_p, Ω_p, ω_p	: 롤러 공전속도, 공전/자전 각속도
\bar{k}	: 나사 리드(lead)	$k = \bar{k}/2\pi$: 스크류 변위/넛트 회전각 비
M_m	: 모터 생성 토크	$F_m = M_m/k$: 구동기 작용력
F_a, M_a	: 공기력(양력, 모멘트)	d_p, h_l	: 스크류 끝단의 초기 위치
M_r, M_s	: 등가 질량	J_r, J_b	: 등가 관성모멘트
f_s, f_n, f_b	: 점성 마찰계수	D_r, D_s, D_n, D_b	: 등가 점성 마찰계수
l_θ, b_θ	: 스크류 속도와 링크 각속도 비	T, Q	: 운동에너지, 작용력
m_X, I_X	: 하첨자 X의 질량, 관성모멘트	r_X, θ_X, ω_X	: 하첨자 X의 반경, 각도, 각속도

Subscripts

s, n, c, p	: 스크류, 넛트, 캐리어, 롤러	$l2, b$: 링크 2, 블레이드
--------------	--------------------	---------	--------------

1. 서 론

1.1 배경

전기-기계식 구동기(Electro-Mechanical Actuator, EMA)는 전기 모터와 기계적 동력전달 요소를 결합한 것으로, 항공기의 조종면이나 장치의 위치를 제어하는 데 사용된다. 최근 친환경 및 경제성 등의 이유로 More Electric Aircraft(MEA) 혹은 All Electric Aircraft(AEA)의 개념이 대두되면서 EMA에 대한 관심이 높아지고 있다[1-3]. 유압 구동기와 비교해서 EMA는 출력과 응답 성능은 상대적으로 낮으나 설계 자유도와 유지보수성은 우수하다. 그래서 점진적으로 EMA가 유압식을 대체할 것이라고 모두가 예상한다.

한편, 대표적인 MEA/AEA인 도심 항공 모빌리티(UAM)는 주 에너지원으로 전기만을 채택하는 비율이 매우 높다[4]. [4]에 의하면 개발 중인 eVTOL의 에너지 원천은 순수배터리가 94개, 하이브리드는 34개, 수소전기는 5개이다. 이러한 eVTOL에는 상대적으로 낮은 요구 출력(power), 유지보수의 간편성, 높은 설계 자유도라는 관점에서 EMA가 적합하며, 결과적으로 EMA 채택율이 높아질 것으로 예상된다.

국내 기업도 UAM 상용화와 함께 고신뢰도의 EMA 개발에 큰 관심을 보인다. 이러한 추세에서 순천대 연구팀은 롤러 스크류에 기반한 EMA의 제어 모델 및 제어 기법 연구를 수행하고 있으며, EMA와 2절 링크로 결합된 블레이드 피치 동역학 방정식을 개발한 결과를 소개한다.

1.2 문헌조사

롤러 스크류는 정확하게는 planetary roller screw라고 하는데 1940년대부터 상용화되었다[5]. 강성과 속도 측면에서 우수하여 주요 구동기로 채택되고 있다. 주요 구성은 롤러, 넛트, 스크류인데 상대 운동에 따라 표준형과 역구동형이 있다[6,7].

롤러 스크류의 설계, 기구학, 동역학에 대한 많은 연구를 찾을 수 있는데 Velinsky 등[8-10]은 롤러 스크류의 기본적인 운동학(kinematics)과 동역학(dynamics)을 해석하였다. 이를 바탕으로 효율, 부하 용량, 미끄럼 효과를 분석하였고, Lagrange 기법을 이용하여 표준형에 대한 동역학 방정식을 유도하였으며, 단위계단 입력에 대하여 동역학 시뮬레이션 결과와 운동학 해석 결과를 비교하여 검증하였다.

Maré 등[11,12]은 bond graph 기법으로 롤러 스크류의 동역학 모델을 개발하고, AMESim이라는 소프트웨어로 구현한 가상 모델과 실제 실험장치의 결과를 비교하였다. 특히, 비선형 강성과 마찰 모델을 개발하여 모델의 정확도를 높였다.

Liu 등[13-16]도 롤러 스크류의 운동학부터 동역학까지 많은 연구를 수행하였다. 벡터 기반의 Newton 동역학을 이용하여 방정식을 유도하였는데[16], 마찰력과 접촉력을 포함하였으며, 시뮬레이션을 통하여 이러한 효과를 검증하였다. Newton 동역학에 기반한 방법은 내력을 계산하는 데 유용하지만 방정식의 유도과정이 복잡하다. [15]에서는 역구동형의 토크 전달과 효율을 해석하였다.

국내에서는 한국형 발사체의 엔진 추력벡터의 방향을 제어하는 용도로 롤러 스크류 기반의 EMA를 채택한 실용 사례가 있는데[17,18], 까다로운 요구성능을 충족한다고 보고하였다.

1.3 수행 내용

본 논문에서는 UAM 로터의 블레이드 피치 각도를 제어할 목적으로 개발하고 있는 롤러 스크류 기반의 선형 구동기에 대한 동역학 모델을 제시한다. 대상 UAM은 3개의 블레이드로 이루어진 로터가 4개 있으며(Fig. 1 참고), 스와쉬플레이트는 없고 블레이드의 피치각을 개별적으로 제어하는 방식이다(IBC, individual blade control). 본 논문에서는 선형 구동기에 의해 제어되는 개별 블레이드의 동역학 모델을 다루고 있다.

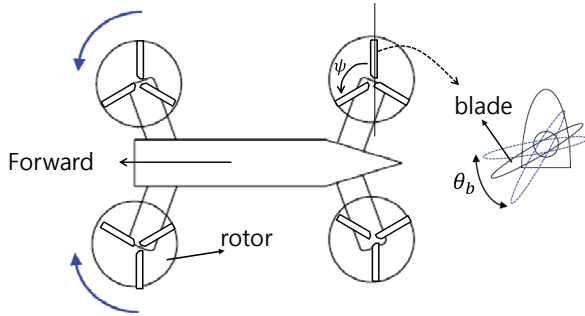


Fig. 1. UAM, rotors, and blades

기존의 연구는 표준형이 주된 대상이었으나 여기에서는 역구동형이 연구 대상이다. 일반적으로 선형 구동기에는 역구동형이 많이 사용된다[6]. 모터의 작용으로 너트를 회전시키고, 너트는 롤러를 구동해서 스크류를 직선 운동하게 만든다.

Lagrange 기법을 이용하여 롤러 스크류의 동역학 방정식을 유도하는데 롤러 스크류의 각 요소가 시스템의 동역학에 미치는 영향을 분석한다. 이는 추후에 구동기를 설계하는데 유용하다.

선형 구동기는 2절 링크를 통하여 로터 블레이드와 결합되는데 이에 대한 동역학 방정식을 유도한다. 2절 링크의 가변적 형상 때문에 시스템은 비선형이 되는데 파라미터의 변동성을 분석하였다.

제시한 내용은 역구동형 롤러 스크류의 동역학 해석과 이를 적용한 제어 시스템의 성능해석에 유용할 것으로 판단한다. 그리고 이것이 본 연구의 기여 내용이다.

다음 절에서는 롤러 스크류의 요소를 분석하였으며, 3절에서는 동역학 방정식을 유도하였다. 4절에서는 개발한 방정식을 수치적 기법으로 분석하였다.

II. 형상 및 운동 모델

2.1 롤러 스크류의 구조와 운동학

Figure 2는 역구동형 롤러 스크류의 구조를 보여주는데 주요 부품은 스크류, 너트(2개), 롤러(N개), 캐리어이다. 너트에는 영구자석이 부착되어 있는데 모터의 전자기 작용으로 생성된 토크가 너트를 회전시킨다. 이 너트는 나사산으로 연결된 롤러를 회전시키고, 롤러는 나사산으로 연결된 스크류를 움직인다. 스크류는 회전하지 않고 직선운동만 한다. 캐리어는 롤러들의 간격과 스크류와 상대위치를 유지하는 역할을 하는데, 앞뒤로 1개씩 있다.

Figure 3은 롤러 스크류의 운동학 해석을 위한 간략화된 단면도이다. 맨 바깥쪽 원(a)은 너트이며, 중간 작은 원(b)은 롤러이고, 맨 안쪽 원(c)은 회전하지 않는 스크류를 나타낸 것이다.

해석을 위하여 다음과 같이 가정한다.

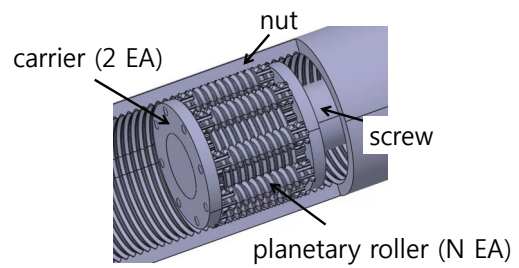


Fig. 2. Inverted roller screw

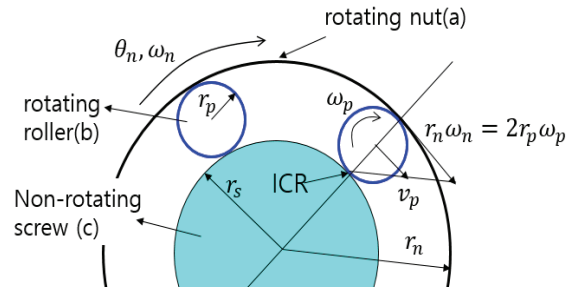


Fig. 3. Roller screw kinematic relation diagram

- 모든 부품은 강체이고, 미끄럼은 없다.
- 원의 치수는 나사산의 유효 지름을 기준한다.

모든 운동은 너트의 회전으로부터 시작한다. 그림에서 ICR(instantaneous center of rotation)은 롤러의 순간 회전중심인데 이는 회전하는 롤러와 회전하지 않는 스크류가 만나는 점(point)이기 때문에 이 점(ICR)에서 롤러의 순간 속도는 영(zero)이다. 그리고 회전하는 너트와 만나는 부분은 너트와 같은 속도로 회전한다[14]. 그래서 다음의 속도 관계식을 얻는다.

$$v_p = \frac{1}{2} r_n \omega_n = r_p \omega_p = (r_s + r_p) \Omega_p \quad (1)$$

Ω_p 는 롤러의 공전 각속도이면서 캐리어의 각속도이다. 참고로 표준형은 너트가 정지하고, 스크류가 회전하는 방식인데, 순간 회전중심은 너트에 존재한다. 이를 기반으로 표준형을 해석한다[14].

스크류는 링크 연결(Fig. 4 참고)에 의해서 회전하지 않고 직선 왕복운동만 한다. 너트가 1회전 할 때

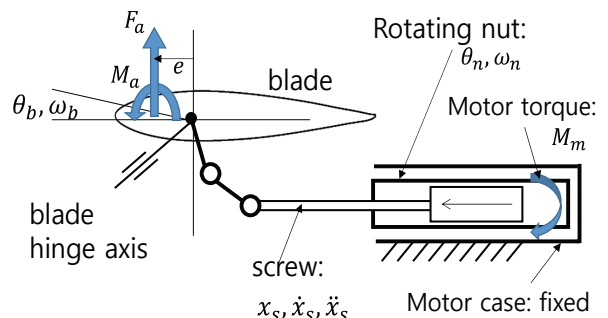


Fig. 4. Blade and roller screw actuator

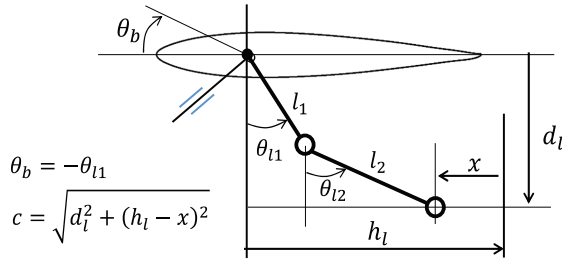


Fig. 5. Geometric relation diagram

스크류가 움직이는 길이를 리드(lead, \bar{k})라고 하며, 너트 회전 각도와 스크류 위치 관계는 다음과 같다.

$$x = k\theta_n, \quad \dot{x} = v_s = k\omega_n, \quad k = \bar{k}/2\pi \quad (2)$$

2.2 블레이드와 2절 링크 구조

구동기를 이용하여 블레이드 피치각을 조종하는데, 구동기와 블레이드는 2절 링크로 연결된다(Figs. 4, 5 참고). 링크 l_1 은 블레이드와 한 몸이며, 힌지 축을 중심으로 회전한다. 그래서 블레이드의 관성모멘트는 블레이드와 링크 l_1 을 포함한다. 편의상 블레이드 피치 각도는 $\theta_b = -\theta_{11}$ 으로 가정하였다.

Figure 5에서 식 (3), (4)의 기하 관계식을 얻는다.

$$d_l = l_1 \cos\theta_{11} + l_2 \cos\theta_{12} \quad (3)$$

$$h_l - x = l_1 \sin\theta_{11} + l_2 \sin\theta_{12} \quad (4)$$

이로부터 유도한 스크류 속도(v_s)와 링크 l_2 및 블레이드의 각속도 관계는 식 (5), (6)이며, θ_{11} 과 x 의 관계는 식 (7)이다. 유도과정은 부록에 제시한다.

$$\dot{\theta}_{12} = l_2 \dot{x} = l_2 v_s, \quad l_2 = \frac{\sin\theta_{11}}{l_2 \cdot \sin(\theta_{12} - \theta_{11})} \quad (5)$$

$$\dot{\theta}_b = b_\theta \dot{x} = b_\theta v_s, \quad b_\theta = \frac{\sin\theta_{12}}{l_1 \cdot \sin(\theta_{12} - \theta_{11})} \quad (6)$$

$$\theta_{11} = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \frac{d_l}{h_l - x} - \cos^{-1} \frac{c^2 + l_1^2 - l_2^2}{2cl_1} \quad (7)$$

사용하는 여러 속도의 관계식은 Fig. 6의 도식으로 표현할 수 있다.

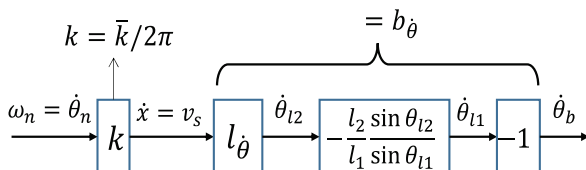


Fig. 6. Kinematic relation through links

III. 운동 방정식 유도

3.1 운동에너지

Lagrange 기법으로 운동 방정식을 유도하기 위해서는 각 요소의 운동에너지를 구해야 한다. 식 (1)~(6)의 속도 관계식을 이용하여 구한 요소별 운동에너지는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} T_n &= \frac{1}{2} I_n \omega_n^2, & T_s &= \frac{1}{2} m_s v_s^2 \\ T_c &= 2 \times \frac{1}{2} (I_c \Omega_p^2 + m_c v_s^2) \\ T_p &= N \times \frac{1}{2} (I_p \omega_p^2 + m_p v_p^2 + m_p v_s^2) \\ T_{l2} &= \frac{1}{2} m_{l2} v_s^2 + \frac{1}{2} I_{l2} \dot{\theta}_{12}^2, & T_b &= \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}_b^2 \end{aligned} \quad (8)$$

이들을 속도 ω_n 과 연관한 것으로 변환하고 총합을 구한 것이 식 (9)이다. 마지막 두 항은 상수가 아니고 링크의 형상에 따라 변한다.

$$\begin{aligned} \frac{2T}{\omega_n^2} &= I_n + m_s k^2 + \frac{1}{2} \left(I_c \frac{r_n^2}{(r_s + r_p)^2} + 4m_c k^2 \right) \\ &+ \frac{N}{4} \left(I_p \frac{r_n^2}{r_p^2} + m_p r_n^2 + 4m_p k^2 \right) \\ &+ [m_{l2} + I_{l2} l_\theta^2] k^2 + I_b (k b_\theta)^2 \end{aligned} \quad (9)$$

로터의 방향에 따라 퍼텐셜 에너지는 영(zero)이 아니지만, 블레이드 무게 중심이 힌지 축과 일치하고, 나머지 요소의 퍼텐셜 에너지는 무시할 수 있다고 가정하였다.

마찰의 영향은 소실(dissipation) 함수를 이용해서 구한다[19]. 스크류 직선 운동, 너트 회전 운동, 블레이드 힌지 회전 운동에 대하여 마찰을 고려하고, 식 (10)의 소실 함수를 정의한다. f_s, f_n, f_b 는 각 운동에 대한 점성 마찰계수이다.

$$P = \frac{1}{2} (f_s v^2 + f_n \omega_n^2 + f_b \omega_b^2) \quad (10)$$

3.2 동역학 방정식: 롤러 스크류 구동기

먼저, 롤러 스크류만의 동역학 방정식을 유도한다. 식 (8)에서 블레이드/링크와 관련된 마지막 두 항을 제외하고, 모든 속도를 v_s 로 변환하며, 식 (10)에서 마지막 항을 제외한다. 그리고 식 (11)의 Lagrange 기법을 이용한다[19].

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial T}{\partial q} = Q - \frac{\partial P}{\partial \dot{q}} \quad (11)$$

q 는 generalized coordinate인데, $q = x, \dot{q} = v_s$ 이다. Q

는 generalized force인데, 모터 토크(M_m)에 의한 작용력이다. 그러면 식 (11)은 다음과 같이 전개된다.

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} = M_r v_s, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) = M_r \dot{v}_s, \quad \frac{\partial T}{\partial q} = 0 \quad (12)$$

$$Q = M_m \frac{\partial \theta_n}{\partial x}, \quad \frac{\partial P}{\partial \dot{q}} = f_s v_s + \frac{f_n}{k^2} v_s \quad (13)$$

위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$M_r \dot{v}_s = -D_r v_s + F_m \quad (14)$$

$$M_r = \frac{I_n}{k^2} + m_s + \frac{1}{2k^2} \left(I_c \frac{r_n^2}{(r_s + r_p)^2} + 4m_p k^2 \right) + \frac{N}{4k^2} \left(I_p \frac{r_n^2}{r_p^2} + m_p r_n^2 + 4m_p k^2 \right) \quad (15)$$

$$F_m = Q = \frac{M_m}{k} \quad (16)$$

$$D_r = f_s + f_n/k^2 \quad (17)$$

실제 질량은 스크류가 가장 크지만, 회전체의 등가 질량도 매우 크다. 상대적으로 리드가 크면 관성모멘트의 영향이 줄어들고, 빨리 움직이기 때문에 응답성이 좋아진다. 그러나 동일한 작용력을 위해서는 필요 토크가 증가해야 하는데(식 (18) 참고), 모터를 설계할 때 부담이 될 수 있다.

$$F_m v_s = F_m k \times (v_s/k) = M_m \omega_n \quad (18)$$

3.3 동역학 방정식: 블레이드 구동 모델

롤러 스크류 구동기에 블레이드 피치 운동과 공기력 외란(F_a , M_a)을 포함한 동역학 방정식을 유도한다. 자세한 유도과정은 부록 A3에 제시하였다.

$$M_s \dot{v}_s = -D_s v_s + F_m - \Delta_s + (eF_a - M_a) b_\theta \quad (19)$$

$$M_s = M_r + [m_{l2} + I_2 l_\theta^2] + I_b b_\theta^2 \quad (20)$$

$$D_s = f_s + f_n/k^2 + f_b b_\theta^2 \quad (21)$$

$$\Delta_s = \frac{1}{2} v_s^2 \frac{dM_s}{dx} = \frac{1}{2} v_s^2 \frac{d}{dx} (I_2 l_\theta^2 + I_b b_\theta^2) \quad (22)$$

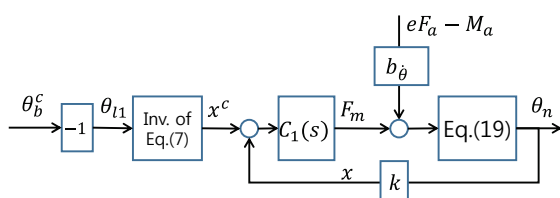


Fig. 7. Model for screw position control

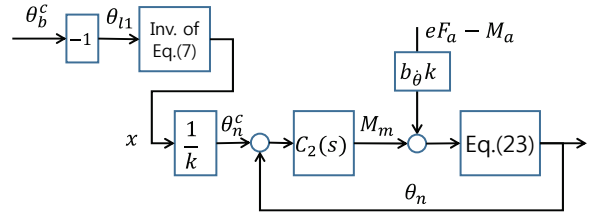


Fig. 8. Model for nut angle control

여기서 M_s 는 스크류 운동의 관점에서 관측한 시스템의 등가 질량이며, 스크류의 위치(x)에 따라 등가 질량이 가변한다. 공기력에 형상 변화가 결합되어 외란으로 작용하는 시스템이다. 이에 대하여 Fig. 7처럼 제어시스템을 구성할 수 있다.

3.4 동역학 방정식: 너트 회전 운동 관점

앞 절의 동역학 방정식을 너트 회전 운동의 관점으로($q = \theta_n$, $\dot{q} = \omega_n$) 정리하는데, 부록 A3의 과정을 따라 유도할 수 있다.

$$J_n \dot{\omega}_n = -D_n \omega_n + M_m - \Delta_n + (eF_a - M_a) k b_\theta \quad (23)$$

$$J_n = k^2 M_s, \quad D_n = k^2 D_s \quad (24)$$

$$\Delta_n = k \Delta_s = \frac{1}{2} k^2 \omega_n^2 \frac{d}{d\theta_n} (I_2 l_\theta^2 + I_b b_\theta^2) \quad (25)$$

여기서 J_n 은 너트 회전 운동의 관점에서 관측한 시스템의 등가 관성모멘트이며, 식 (9)의 우측 항이 된다. M_s 와 마찬가지로 J_n 도 가변적인데, 모터에서 동일한 토크를 가하더라도 링크 형상에 따라 블레이드에 가해지는 모멘트는 달라진다. Fig. 8은 식 (23)을 기준해서 구성한 제어시스템의 예시이다.

3.5 동역학 방정식: 블레이드 피치각 관점

블레이드 피치각 θ_b 를 변수로 설정하고 이에 대한 동역학 식을 구한다. $q = \theta_b$, $\dot{q} = \dot{\theta}_b$ 로 하고, 식 (11)을 이용하여 방정식을 유도한다(부록 A3 과정 참고).

$$J_b \dot{\omega}_b = -D_b \omega_b + \frac{M_m}{k b_\theta} - \Delta_b + (eF_a - M_a) \quad (26)$$

$$J_b = \frac{J_n}{k^2 b_\theta^2} = [J_{nscpl2}] \times \frac{1}{k^2 b_\theta^2} + I_b \quad (27)$$

$$D_b = (f_s k^2 + f_n) / (k b_\theta)^2 + f_b \quad (28)$$

$$\Delta_b = \frac{1}{2} \omega_b^2 \frac{dJ_b}{d\theta_b} = \frac{1}{2} \omega_b^2 \frac{d}{d\theta_b} \left(\frac{J_{nscpl2}}{k^2 b_\theta^2} \right) \quad (29)$$

여기서 J_{nscpl2} 는 식 (9)에서 $I_b k^2 b_\theta^2$ 를 제외한 나머지이다. Fig. 9는 식 (26)을 기준해서 구성한 제어 시스템의 예시이다.

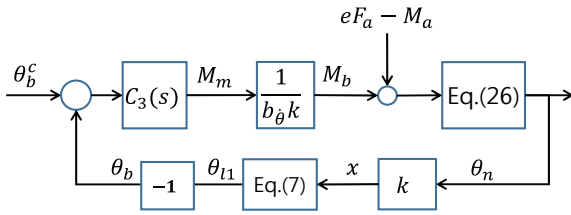


Fig. 9. Model for blade angle control

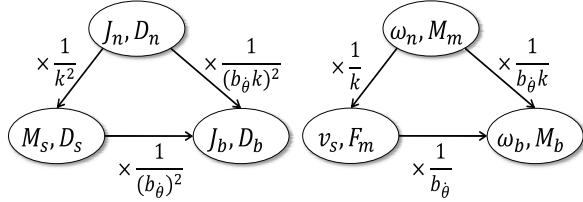


Fig. 10. Relations of parameters and variables

식 (19), (23), (26)은 같은 시스템을 기술하는 방정식이며, 파라미터와 변수의 관계는 Fig. 10과 같다.

IV. 시뮬레이션 및 분석

4.1 시뮬레이션 파라미터

예제 시스템의 파라미터는 Table 1에 제시한다. 구동기의 최대 행정(stroke)은 150 mm이다.

구동기가 1 hz로 최대 행정거리를 왕복한다고 가정할 때($x = (0.15/2) \times (1 - \cos 2\pi t)$), 각 요소의 운동과 가변 특성을 분석하였다.

Figure 11은 시간에 따른 변수의 변화를 보여준다. 그림에서 두 개의 수직선은 블레이드 피치 각도(θ_b)가 0~40 deg의 구간을 나타낸다. 첫 번째 그림은 스크류의 위치이고, 두 번째는 링크와 블레이드 피치 각도이다. 블레이드 피치 각도는 -17~72 deg로 변한다. 실제로 블레이드 피치각은 비행 모드에 따라 제한된 각도 범위에서 회전한다. 세 번째는 l_{θ} , b_{θ} 인데, 링크 형상(θ_{l2} 혹은 x)에 따라 변한다.

Table 1. Parameters for Simulation

	value	unit		value	unit
m_s	0.8	kg	N	8	-
k	$0.015/2\pi$	m/rad	I_p	1.15×10^{-7}	kg-m ²
r_s	0.017	m	m_p	0.0149	kg
I_n	7.8×10^{-4}	kg-m ²	r_p	0.004	m
r_n	0.025	m	I_b	0.3	kg-m ²
I_c	1.75×10^{-5}	kg-m ²	l_1, l_2	0.08	m
m_c	0.0484	kg	m_{l2}	0.041	kg
d_r, h_l	0.1	m	I_{l2}	1×10^{-4}	kg-m ²

4.2 등가 질량 및 관성모멘트 가변 분석

Figure 12는 등가 질량 및 관성모멘트의 변동을 보여준다. 첫 번째 그림은 등가 질량 M_s 를 분석한 것인데, 너트와 블레이드의 비중이 제일 크고, 블레이드($I_b b_{\theta}^2$)가 변동의 원인인 것을 보인다.

두 번째 그림은 등가 관성모멘트 J_n 을 분석한 것인데, $J_n = k^2 M_s$ 이기 때문에 첫 번째 그림과 유사한 결과가 된다.

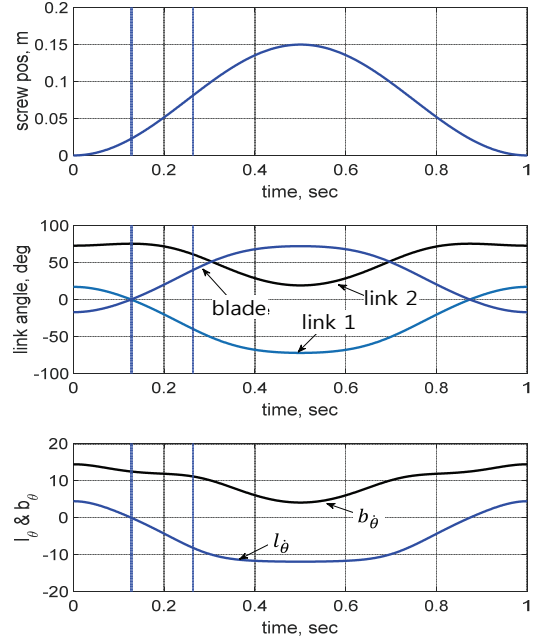


Fig. 11. Variables with respect to time

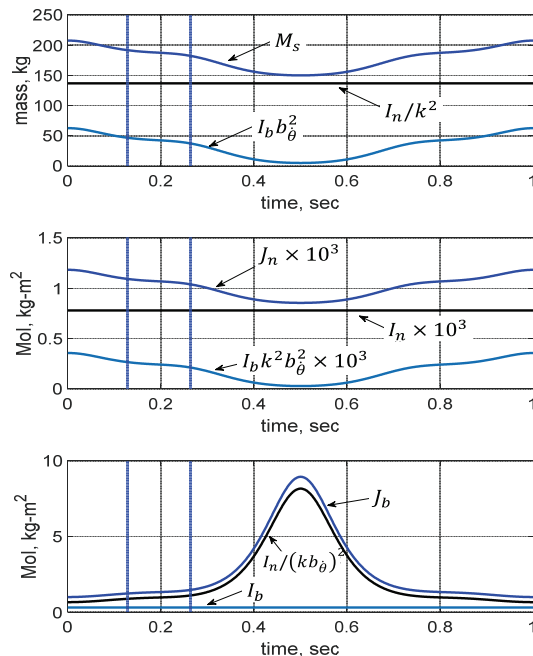


Fig. 12. Variations of M_s, J_n, J_b

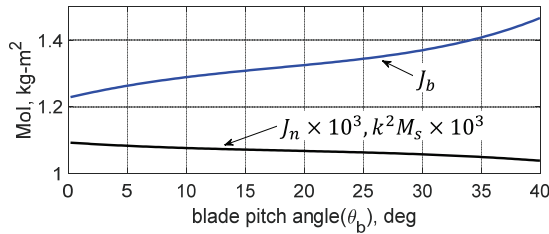
Fig. 13. Variation of M_s , J_n , J_b about θ_b

Table 2. Variation analysis

	A	B	C	$\frac{(B-A)}{2C} \times 100$
	min	max	(A+B)/2	
M_s	182.23	191.73	186.98	2.5 %
$J_n \times 10^3$	1.0386	1.0927	1.0657	2.5 %
J_b	1.2292	1.4662	1.3476	8.8 %

세 번째 그림은 등가 관성모멘트 J_b 를 분석한 것인데, 너트가 비중이 제일 크면서도 변동의 원인이다.

Figure 13은 블레이드 피치각 범위 0~40 deg에 대하여 M_s , J_n , J_b 를 보인 것이며, 변동에 대한 분석을 Table 2에 정리하였다. 표에서 마지막 열은 평균값을 기준한 변동량의 비를 보인 것인데 J_b 가 상대적으로 변동이 크다. 제어기 설계를 위해서는 파라미터 변동이 적은 것이 유리하므로 스크류나 너트 운동 관점의 방정식을 활용하는 것을 제안한다.

V. 결 론

역구동형(inverted type) 톨러 스크류 기반의 구동기와 이를 통해 조종되는 블레이드 피치 회전 동역학 방정식을 다양한 관점에서 분석하였다. 2절 링크를 통하여 연결된 블레이드 시스템은 비선형이면서 등가 관성모멘트가 링크 형상에 따라 변한다.

제어기 설계를 위해서는 시스템의 변동성이 작은 것이 유리한데, 이를 분석하고 비교하였다. 사례로 선택한 모델에서는 스크류나 너트 운동의 관점에서 측정된 등가 질량 혹은 관성모멘트의 변동량은 2.5% 수준(평균값 기준)이며, 블레이드 피치 운동의 관점에서 측정된 등가 관성모멘트의 변동량은 8.8% 수준(평균값 기준)으로 나타났다. 이런 경우에는 전자의 모델링을 사용할 것을 제안한다.

본 논문에서 제시한 내용은 역구동형 톨러 스크류의 동역학 해석 및 블레이드 시스템의 제어 해석을 위한 기본자료로 유용하다고 판단한다.

후속 연구로 블레이드 피치각 제어기 개발을 진행할 예정인데, 앞에서 분석한 것처럼 형상과 공기력 변동을 함께 처리해야 하는 도전적인 과제이다.

후 기

본 논문은 2021년도 정부(산업통신자원부)의 재원으로 한국산업기술평가관리원의 지원을 받아 수행된 연구 결과임(No.20015907, eVTOL 모빌리티용 고신뢰도, 고속, 고효율 다중화 전기식 작동기 개발).

Appendix

A1. 링크 속도 관계식 유도

식 (3)을 시간에 대해 미분하여 다음 식을 얻는다.

$$\dot{\theta}_{11} = -\frac{l_2}{l_1} \frac{\sin\theta_{12}}{\sin\theta_{11}} \dot{\theta}_{12}, \quad \dot{\theta}_{12} = -\frac{l_1}{l_2} \frac{\sin\theta_{11}}{\sin\theta_{12}} \dot{\theta}_{11} \quad (30)$$

식 (4)를 시간에 대해 미분하여 다음 식을 구한다.

$$\dot{x} = -l_1 \cos\theta_{11} \dot{\theta}_{11} - l_2 \cos\theta_{12} \dot{\theta}_{12} \quad (31)$$

식 (30)을 대입하고 정리하여 다음 식을 얻는다.

$$\dot{x} = \frac{l_2 \sin(\theta_{12} - \theta_{11})}{\sin\theta_{11}} \dot{\theta}_{12} \quad (32)$$

이로부터 식 (5)를 구한다. 식 (30)의 두 번째 식을 식 (31)에 대입하여 식 (6)을 얻는다($\dot{\theta}_b = -\dot{\theta}_{11}$).

A2. 스크류 위치와 링크 각도 관계식 유도

Figure 14의 각도 관계와 코사인 법칙을 이용하여 각도 α , β , θ 를 구한다.

$$\alpha = \cos^{-1}[(c^2 + l_1^2 - l_2^2)/(2cl_1)] \quad (33)$$

$$\beta = \cos^{-1}[(c^2 + l_2^2 - l_1^2)/(2cl_2)] \quad (34)$$

$$\theta = \tan^{-1}[d_l/(h_l - x)] \quad (35)$$

그러면 $\theta_{11} = \pi/2 - \theta - \alpha$ 로 식 (7)을 얻는다. 참고로 $\theta_{12} = \pi/2 - \theta + \beta$ 이다.

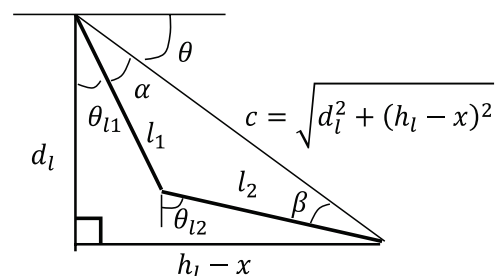


Fig. 14. Angle relation diagram

A3. 스크류 운동 관점 블레이드 구동 모델

$q = x$, $\dot{q} = v_s$ 로 하고, 식 (9), (10)을 식 (11)에 적용한다. M_r 에는 가변하는 요소가 포함되어 있다.

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} = M_r v_s, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}} \right) = M_r \dot{v}_s + \dot{M}_r v_s \quad (36)$$

$$\frac{\partial T}{\partial q} = \frac{1}{2} v_s^2 \frac{dM_r}{dx} = \frac{1}{2} v_s^2 \frac{d}{dx} (I_b l_\theta^2 + I_b b_\theta^2) \quad (37)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \dot{q}} = f_s v_s + \frac{f_n}{k^2} v_s + f_b b_\theta^2 v_s \quad (38)$$

$$Q = F_m + (e F_a - M_a) \frac{\partial \theta_b}{\partial x} \quad (39)$$

식 (36)에서 $\dot{M}_r v_s$ 은 다음처럼 정리할 수 있다.

$$\dot{M}_r v_s = \frac{dM_r}{dx} \frac{dx}{dt} v_s = v_s^2 \frac{dM_r}{dx} \quad (40)$$

식 (39)에서 $\partial \theta_b / \partial x = b_\theta$ 를 이용하고, 이 모두를 정리하면 식 (19)를 얻는다.

References

- 1) Yoon, G., Park, H. and Jang, K., "The State of the Art and Application of Actuator in Aerospace," *Journal of the Korean Society of Propulsion Engineers*, Vol. 14, No. 6, 2010, pp. 89~102.
- 2) Maré, J. and Fu, J., "Review on Signal-By-Wire and Power-By-Wire Actuation for More Electric Aircraft," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 30, No. 3, 2017, pp. 857~870.
- 3) Qiao, G., Liu, G., Shi, Z., Wang, Y., Ma, S. and Lim, T., "A Review of Electromechanical Actuators for More/All Electric Aircraft Systems," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 232, No. 22, November 2018, pp. 4128~4151.
- 4) Samjong KPMG, *Samjong Insight: UAM*, Vol. 70, 2020, p. 7.
- 5) https://en.wikipedia.org/wiki/Roller_screw
- 6) <https://www.olsenactuators.com/>
- 7) <http://rollvis.com/swiss/?lang=en>
- 8) Velinsky, S., Chu, B. and Lasky, T., "Kinematics and Efficiency Analysis of the Planetary Roller Screw Mechanism," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 131, No. 1, January 2009, 011016.
- 9) Jones, M. and Velinsky, S., "Kinematics of

Roller Migration in the Planetary Roller Screw Mechanism," *Journal of Mechanical Design*, Vol. 134, No. 6, June 2012, 061006.

10) Jones, M. H., Velinsky, S. A. and Lasky, T. A., "Dynamics of the Planetary Roller Screw Mechanism," *Journal of Mechanisms and Robotics*, Vol. 8, No. 1, February 2016, 014503.

11) Karam, W. and Maré, J., "Modelling and Simulation of Mechanical Transmission in Roller Screw Electromechanical Actuators," *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 81, No. 4, 2009, pp. 288~298.

12) Fu, J., Maré, J. and Yongling, F., "Modelling and Simulation of Flight Control Electromechanical Actuators with Special Focus on Model Architecting, Multidisciplinary Effects and Power Flows," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 30, No. 1, February 2017, pp. 47~65.

13) Ma, S., Liu, G., Tong, R. and Zhang, X., "New Study on the Parameter Relationships of Planetary Roller Screws," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2012, Article ID 340437, 2012.

14) Ma, S., Zhang, T., Liu, G., Tong, R. and Fu, X., "Kinematics of Planetary Roller Screw Mechanism considering Helical Directions of Screw and Roller Threads," *Mathematical Problems in Engineering*, Vol. 2015, Article ID 459462, 2015.

15) Qiao, G., Liu, G., Ma, S., Shi, Z. and Lim, T., "Friction Torque Modelling and Efficiency Analysis of the Preloaded Inverted Planetary Roller Screw Mechanism," *ASME 2017 International Design Engineering Technical Conferences*, Ohio, USA, August 2017, DETC2017-68006.

16) Fu, X., Liu, G., Tong, R., Ma, S. and Lim, T., "A Nonlinear Six Degrees of Freedom Dynamic Model of Planetary Roller Screw Mechanism," *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 119, January 2018, pp. 22~36.

17) Lee, H. and Kang, E., "Development of Direct drive Electro-mechanical Actuation System for Thrust Vector Control of KSLV-II," *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences (in Korean)*, Vol. 44, No. 10, 2016, pp. 911~920.

18) Um, S., et al., "Acceptance Test of Roll Control Actuation System QM for TLV," *Proceeding of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, 2019, pp. 1310~1311.

19) Greenwood, D., *Principles of Dynamics*, 2nd ed. Prentice-Hall, 1987, pp. 262~279.