

블레이드 피치 제어용 전기-기계식 작동기 부품 신뢰성 수명 분석

김현기^{1*}, 한창운²

¹한국항공우주연구원, ²한국뉴욕주립대학교

Analysis of Reliability Life for Components of Electro-Mechanical Actuator for Blade Pitch Control

Hyun-gi Kim^{1*}, Changwoon Han²

¹Korea Aerospace Research Institute

²Department of Mechanical Engineering, SUNY Korea

요약 전기 수직 이착륙 항공기가 도심과 주변 광역권의 차세대 교통수단으로 주목받고 있다. 또한, 전기 수직 이착륙 항공기를 도심에서 운행하기 위해 친환경적 요소가 강조되고 있는데, 그 일환으로 전기-기계식 작동기를 적용하는 연구 개발이 진행되고 있다. 하지만, 전기기계식 작동기는 개발이력이 짧기 때문에, 신뢰성 확보가 중요한 문제이다. 본 논문에서는 전기-기계식 작동기 부품들의 고장률 분석을 통해 전기 수직 이착륙 항공기의 개별 블레이드 피치 제어용 전기-기계식 작동기를 구성하는 각 부품들의 신뢰성 수명을 분석하였다. 이를 위해, 개별 블레이드 피치 제어용 전기-기계식 작동기에 대해 기계적 시스템인 구동장치와 전기적 시스템인 제어기로 구분하고, 각 시스템을 구성하는 부품들에 대해 분석하였다. 그리고, RTCA DO-160을 기반으로 전기-기계식 작동기가 운용되는 환경에 대해 217-Plus와 NSWC-11 같은 신뢰성 평가자료를 적용하여 주요 부품들의 고장률을 계산하였다. 최종적으로, 각 부품들의 고장률 분석 결과를 반영하여 전기 수직 이착륙 항공기의 개별 블레이드 피치 제어용 전기-기계식 작동기를 구성하는 주요 부품들에 대한 신뢰성 수명을 평가하였다.

Abstract Electric vertical take-off and landing aircraft (eVTOLs) are attracting attention as a next-generation means of transportation in urban areas and surrounding metropolitan areas. In addition, eco-friendly factors are being emphasized when operating an eVTOL in urban areas. As part of this, research and development are underway to apply electro-mechanical actuators (EMAs). On the other hand, the reliability confirmation of EMAs is an important issue because EMAs have a short development history. This study examined the reliability life of each component constituting the EMA for controlling the individual blade pitch of eVTOLs by analyzing the failure rate of EMA components. The EMAs were divided mainly into a driving device, which is a mechanical system, and a controller, which is an electrical system. The components of each system were analyzed. Based on RTCA DO-160, considering the environment in which the EMAs are operated, the reliability evaluation data of 217-Plus and NSWC-11 were applied to calculate the failure rate of components of the EMA. Finally, the reliability lifespan of the major components that make up the EMA of an eVTOL was evaluated by reflecting the analysis results of the failure rate of each component.

Keywords : Electro-Mechanical Actuator(EMA), Electric Vertical Take-off and Landing(eVTOL), Failure Rate, Mean Time Between Failure(MTBF), NSWC-11, 217-Plus

본 연구는 2024년도 산업통상자원부 및 한국산업기술기술평가원(KEIT)의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호 20015907, eVTOL 모빌리티용 고신뢰도, 고속, 고효율(1KW급) 다중화(2중화) 전기식 작동기 개발)

*Corresponding Author : Hyun-gi Kim(Korea Aerospace Research Institute)

email: shotgun1@kari.re.kr

Received March 11, 2024

Revised March 26, 2024

Accepted May 3, 2024

Published May 31, 2024

1. 서론

현재, 전기수직 이착륙 항공기(Electric Vertical Take-off and Landing, 이하 eVTOL)가 도심 운용에 적합한 차세대 교통수단으로 주목 받고 있다. 그리고, eVTOL의 도심 운용을 위해 친환경 기술의 적용이 강조되고 있는데, 그 일환으로 전기-기계식 작동기(Electro-Mechanical Actuator, 이하 EMA)를 적용하는 연구개발이 진행되어 왔다. EMA는 전력을 사용하여 모터의 회전력을 변환해 원하는 동작을 생성한다. EMA는 기존의 공압식이나 유압식 작동기와 비교하여 무게와 크기를 줄일 수 있고, 정교한 제어가 가능하다는 장점이 있다. 구체적인 EMA 연구로 항공기 조향 제어장치[1], 우주발사체 자세제어[2], 무인 비행체의 조종면 제어[3,4]에 적용하는 연구 개발이 수행 된 바 있다. 최근에는 eVTOL의 도심운용을 위해 EMA로 블레이드 피치를 제어하여 진동과 소음을 줄이는 연구개발이 진행되고 있는데, 구체적으로 UAM의 로터 블레이드 피치각을 조종하는 EMA 시스템의 동역학 모델 연구[5], eVTOL 블레이드 피치 제어용 선형 구동기의 구조 안전성 평가[6], eVTOL 블레이드 피치 제어용 EMA의 피로수명 평가기, 공기력 추정에 의한 블레이드 피치각도 제어기법에 대한 연구[8]가 수행되고 있다.

본 연구에서는 EMA의 신뢰성 연구의 일환으로, 고장률 분석을 통해 eVTOL에 적용되는 개별 블레이드 제어(Individual Blade Control, 이하 IBC) EMA의 주요 부품들에 대한 신뢰성 수명예측을 수행하였다. 이를 위해, IBC EMA를 기계적 시스템인 구동장치와 전기적 시스템인 제어기로 구분하고, 각 시스템을 구성하는 주요 부품들에 대해 분석하였다. 그리고, RTCA DO-160[9]를 기반으로 EMA의 운용환경에 대해 217-Plus[10]와 미국 해상무기센터(Naval Surface Warfare Center, 이하 NSWC)의 신뢰성 평가문헌인 NSWC-11[11]과 같은 고장모드 및 영향 분석(Failure Mode and Effect Analysis, 이하 FMEA) 자료를 통해 각 시스템을 구성하는 주요 부품들에 대한 고장률을 계산하였다. 최종적으로 고장률



Fig. 1. EMA for IBC in eVTOL

분석 결과를 적용하여 IBC EMA의 주요 부품들에 대한 신뢰성 수명을 분석하였다. 참고로, Fig. 1은 IBC EMA가 적용되는 eVTOL 형상이다.

2. 시스템 구성과 주요 부품

Fig. 2와 같이 IBC EMA는 기계적 시스템인 구동장치와 전기적 시스템인 제어기로 구성되어 있다. 기계식 구동장치는 모터를 통해 전기적 에너지를 기계적 에너지로 전환하여 블레이드 피치를 제어하고, 고장 방지를 위해 내부모터가 이중화 되어 있다. 그리고, 제어기는 메인 컴퓨터와의 통신을 통해 EMA의 현재 상태를 확인한다. 또한, 한쪽의 EMA 고장시 다른 EMA를 작동할 수 있도록 2개의 EMA를 제어하도록 설계되어 있다.

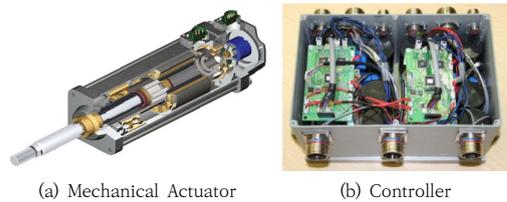


Fig. 2. Configuration of the EMA system

2.1 기계식 구동장치 부품

Table 1과 같이 IBC EMA의 기계식 구동장치는 EMA 본체를 보호하는 하우징(housing), EMA의 위치 및 상태를 확인하는 레졸버(resolver), 리드 스크류(lead screw) 조립체, EMA의 변위를 확인하는 LVDT 조립체, 스크류를 제어하는 모터(motor), 모터 또는 스크류의 회전을 멈추게 하는 브레이크(brake), 윤활유 및 공기압의 누설을 막기 위한 오링(O-ring) 등으로 구성되어 있다.

Table 1. Main Components of Mechanical Actuator

No.	Components	No.	Components
1	Housing of Motor	5	Clevis
2	Resolver Assembly	6	Motor
3	Lead Screw Assembly	7	Brake
4	LVDT Assembly	8	O-ring

2.2 제어기 부품

IBC EMA의 제어기는 제어부, 전원부 및 구동부로 나눌 수 있다. 제어부는 메인회로, 계측회로 그리고 통신회

로 구분된다. 구체적으로, 메인회로는 집적회로(Integrated Circuit, 이하 IC) 칩(chip), 전압 및 전류를 변경하는 저항, 그리고 회로를 보호하는 커패시터 및 동작을 확인하는 LED 등이 있다. 계측회로는 측정되는 데이터를 정확하게 확인하기 위해 데이터 신호를 증폭하는 연산증폭기(Operational Amplifier, 이하 OP AMP)와 전류 및 전압 특성을 제어하고 보호하는 저항과 커패시터(capacitor), 신호를 일정한 방향으로 출력하는 다이오드(diode) 등이 있다. 통신회로는 레졸버에서 발생하는 신호를 수신하여 데이터를 내보내는 IC 칩과 필요한 전류 및 전압을 제어하는 저항, 회로를 보호하는 커패시터, 신호의 잡신호를 제거하기 위한 인덕터 그리고 신호를 증폭하고 정류하는 트랜지스터 등이 있다. Table 2는 제어부를 구성하는 주요 회로와 부품들을 나타내고 있다.

Table 2. Main Components of Control Unit

Component	Components	Circuit Title	Components
Main Circuit	IC chip	Communication Circuit	IC chip
	Resistor		Resistor
	Capacitor		Capacitor
	LED		Diode
	OP AMP		Transistor
Measuring Circuit	Resistor		Trans
	Capacitor		Inductor
	Diode		

Table 3과 같이 제어기의 전원부는 전원 공급회로와 감시회로로 구성되어 있다. 전원공급회로는 제어기 및 구동부에 전원을 공급하기 위한 5개의 IC 칩과 전압 및 전류를 변경하는 저항, 회로를 보호하는 커패시터, 전류의 정류를 수행하는 다이오드, 잡신호 제거 필터, 신호를 증폭시키는 MOSFET 등이 있다. 전원을 확인하는 감시회로는 3개의 IC 칩과 전류를 변경시키는 저항, 회로를 보호하는 커패시터 및 역신호를 제거하는 다이오드 및 상태를 확인하는 LED 등이 있다.

제어기의 구동부는 Table 4와 같이 제어회로와 검출회로로 구성되어 있다. EMA의 모터를 제어하는 제어회로는 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터 모듈(Insulated Gate Bipolar Transistor, 이하 IGBT), 구동부를 제어하기 위한 IC 칩, 전압 및 전류를 변경하는 저항과 회로를 보호하는 커패시터, 전류의 정류를 수행하는 다이오드, 잡신호 제거필터 및 신호를 증폭시키는 금속 산화막 반도체 전계효과 트랜지스터(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 이하 MOSFET) 등이 있다.

검출회로에는 모터에 인가되는 전류값을 검출하기 위한 IC 칩과 신호를 증폭시키기 위한 OP Amp., 정류를

위한 다이오드, 전류를 변경시키는 저항과 회로를 보호하는 커패시터 등이 있다.

Table 3. Main Components of Power Supply

Component	Components	Component	Components
Power Supply Circuit	IC chip	Monitoring Circuit	IC chip
	Resistor		Resistor
	Capacitor		Capacitor
	Diode		Diode
	MOSFET		LED
	Line Filter		

Table 4. Main Components of Driving Part

Component	Components	Component	Components
Control Circuit	IGBT Module	Detection Circuit	IC chip
	IC chip		Resistor
	Resistor		Capacitor
	Capacitor		Diode
	MOSFET		OP Amp.
	Transistor		
	Diode/LED		
	OP Amp.		

3. 고장률 분석

본 장에서는 기계식 구동장치와 제어기의 주요 부품에 대한 고장률 계산을 위해 사용되는 파라미터와 관련 식을 살펴보고, 주요 부품들의 고장률을 분석하였다.

3.1 기계식 구동장치

기계식 구동장치의 주요 부품인 볼트, 나사 및 너트는 NSCW-11에서 체결부품으로 분류되고 있으며, 식 (1)을 통해 해당 부품들의 고장률을 계산할 수 있다. 특히, 볼트의 고장률은 제품을 사용하는 표준 조건과 제품의 크기에 따라 기본 고장률을 설정할 수 있다[11].

$$\lambda_p = \lambda_{P,B} \cdot C_{SZ} \cdot C_L \cdot C_T \cdot C_I \cdot C_K \quad (1)$$

여기서,

- λ_p : 체결부품 고장률
- $\lambda_{P,B}$: 체결부품 기본 고장률
- C_{SZ} : 체결부품 크기 지수
- C_L : 체결부품 하중 지수
- C_T : 온도상승 지수
- C_K : 응력집중 배증지수
- C_I : 주기적 충격하중 심각성 지수

기계식 구동장치에서 두 번째로 많은 부품인 와셔의 고장률은 식 (2)로 계산된다. 구체적으로, 와셔의 기본고장률($\lambda_{SP,B}$)은 2.6, 와셔의 재료는 스테인리스 스틸로써

재료영률지수(C_E)는 0.98이다. 재료 두께지수(C_t), 와셔 크기지수(C_D), 와셔 하중지수(C_f)는 NSCW-11에서 제공하는 식에 따라 구할 수 있다. 참고로, 재료 두께지수는 식 (3)으로 계산되는데, 와셔 두께는 0.0197inch이므로 지수는 0.4893로 계산된다. 그리고, 크기지수 2.105, 하중지수 9.88×10^{-3} . 인장강도 지수(C_Y)는 16.46, 곡선수 지수(C_{NW})는 2.78, 부식환경지수와 제조공정지수(C_R , C_M)는 1.0으로 설정하였다. 해당 지수값을 적용한 결과, 와셔 고장률(λ_{SP})은 1.2×10^{-4} 로 파악되었다.

$$\lambda_{SP} = \lambda_{SP,B} \cdot C_E \cdot C_t \cdot C_D \cdot C_f \cdot C_Y \cdot C_S \cdot C_{CS} \cdot C_R \cdot C_M \quad (2)$$

여기서,

- λ_{SP} : 고장률
- C_E : 재료영률 지수
- C_D : 와셔 크기 지수
- C_f : 재료 인장강도 지수
- C_{CS} : 사이클 지수
- C_M : 제조공정 지수
- $\lambda_{SP,B}$: 기본고장률
- C_t : 재료두께 지수
- C_f : 와셔 변위 하중지수
- C_{NW} : 곡선수 지수
- C_R : 부식환경 지수

$$C_t = \left(\frac{t}{0.025}\right)^3 \quad (3)$$

모터에 대한 고장률은 식 (4)로 계산된다. 여기서, 본 논문의 IBC EMA에 사용되는 모터는 BLDC(Brushless DC)이므로, 기본 고장률($\lambda_{M,B}$)은 1.75로 설정하였다. 그리고, IBC EMA는 외부 바람을 받으며 순방향과 역방향으로 반복 동작하기 때문에 모터하중지수(C_{SF})는 3.0으로 결정하였다. 모터권선 기본고장률($\lambda_{WT,B}$)은 40 failure/million hours이며, 외부온도(C_T)는 RTCA DO-160의 C2등급에서 제시하는 지상 보관온도(85℃), 작동온도 70℃를 적용하여 계산하였다. 전력지수(C_i)는 전압오차 3%를 반영하여 2.577을 적용하였다. 그 결과, 모터권선 고장률(λ_{WT})은 103.098로 계산되었다.

브러쉬(brush)와 하우징(housing)의 고장률(λ_{BS} , λ_{ST})은 1988년 H.Wayen Beaty and James L. Kirtley, Jr.가 작성한 Electric Motor Handbook에서 제시하고 있다 [10]. 전기자축과 베어링(λ_{AS} , λ_{BE})의 고장률은 1.21×10^{-9} , 기어박스 고장률(λ_{GR})은 2.04×10^{-9} 로 설정하였고, 커패시터 고장률(λ_C)은 1.0으로 설정하였다. 이러한 파라미터들을 적용한 결과, 모터의 고장률은 110.349로 계산되었다.

$$\lambda_M = (\lambda_{M,B} \cdot C_{SF}) + \lambda_{WT} + \lambda_{BS} + \lambda_{ST} + \lambda_{AS} + \lambda_{BE} \quad (4)$$

$$+ \lambda_{GR} + \lambda_C$$

여기서,

- λ_M : 고장률
- C_{SF} : 모터 하중지수
- λ_{BS} : 브러쉬 고장률
- λ_{AS} : 전기자축 고장률
- λ_{GR} : 기어 고장률
- $\lambda_{M,B}$: 기본 고장률
- λ_{WT} : 모터 권선 고장률
- λ_{ST} : 하우징 고장률
- λ_{BE} : 베어링 고장률
- λ_C : 커패시터 고장률

브레이크는 액추에이터, 베어링 및 실링 등의 부품들로 구성된 시스템으로, 브레이크의 고장률은 식 (5)와 같다. 액추에이터, 베어링 및 실링 등의 고장률은 NSWC-11에서 제시하는 자료로 계산되는데, 브레이크의 고장률 계산을 위한 파라미터 값은 Table 5에 주어져 있다.

$$\lambda_{BR} = \lambda_{AC} + \lambda_{SP} + \lambda_{FR} + \lambda_{BE} + \lambda_{SE} + \lambda_{HO} \quad (5)$$

여기서,

- λ_{BR} : 브레이크 고장률
- λ_{SP} : 스프링 고장률
- λ_{FR} : 브레이크 마찰재료 고장률
- λ_{BE} : 베어링 고장률
- λ_{HO} : 브레이크 하우징 고장률
- λ_{AC} : 액추에이터 고장률
- λ_{SE} : 실링 고장률

Table 5. Parameter and Failure Rate for Brake

Parameter	value	Parameter	value
λ_{AC}	1.0	λ_{BE}	7.244×10^{-8}
λ_{SP}	0.0	λ_{SE}	1.2
λ_{FR}	1.0	λ_{HO}	3.0
λ_{BR}	6.2		

3.2 제어기

IBC EMA의 제어기 부품 중에서 가장 많이 차지하는 부품인 커패시터의 고장률은 식 (6)으로 계산될 수 있다. 커패시터 고장률(λ_P)은 신뢰도 성장 고장률 승수(π_G)를 기반으로 구동, 비구동에 따른 온도 및 운영환경 고장률 승수의 곱과 솔더 접합에 대한 기본고장률 및 유도고장률의 합으로 계산한다.

$$\lambda_P = \pi_G \pi_C (\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} \pi_S + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} \quad (6)$$

$$+ \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{SIB} \pi_{SJD} + \lambda_{IND}$$

여기서,

- λ_P : 예측 고장률
- λ_{EB} : 환경 기본고장률
- λ_{OB} : 동작 기본고장률
- π_C : 용량에 대한 고장률 승수

π_G : 신뢰도 성장 고장률 승수
 π_{DCO} : duty cycle 고장률 승수(구동)
 π_{TO} : 온도 고장률 승수(구동)
 π_{TE} : 온도 고장률 승수(비구동)
 π_S : 전기적 전압 스트레스 고장률 승수
 π_{DCN} : 반복 고장률 승수(비구동)
 λ_{TCB} : 온도사이클 기본고장률
 π_{CR} : 사이클 고장률 승수 π_{DT} : 온도차 고장률 승수
 π_{DT} : 온도차 고장률 승수
 λ_{SJB} : 납땜 기본고장률 λ_{IND} : 유도 고장률
 π_{SJDT} : 납땜접촉부 온도변화 고장률 승수

트랜지스터 고장률은 식 (7)로 계산된다.

$$\lambda_P = \pi_G(\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} \pi_S + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{SJB} \pi_{SJDT} + \lambda_{IND} \quad (7)$$

트랜지스터의 고장률 계산시 고장률 승수, 운영 기본 고장률, 운영 사이클 고장률 승수 및 운영 온도에 대한 고장률 승수 등에 대한 인자들은 트랜지스터 종류에 따른 매개변수를 이용하여 필요한 인자값을 계산한다. 또한, 트랜지스터 고장율에는 하중에 따른 고장률 승수(π_S) 인자가 반영되어야 하는데, 하중에 따른 고장률 승수는 식 (8)로 계산한다. 컬렉터와 이미터에 걸리는 인가전압/정격전압(V_S)는 기준값($V_{sdefault}$)인 0.5를 기준으로 계산하였다. 그 결과, Bipolar 트랜지스터 고장률은 2.332×10^{-2} 로 파악되었다.

$$\pi_S = 0.21e^{3.1V_S}; V_S = \frac{V_{CEApplied}}{V_{CErated}} \quad (8)$$

변압소자 고장률은 식 (9)로 계산된다. 변압소자의 고장률 계산시 고장률 승수, 운영 기본 고장률, 운영 사이클에 대한 고장률 승수 및 운영온도에 대한 고장률 승수 등에 대한 인자들은 변압소자 형태에 따라 매개변수를 이용하여 필요한 인자값을 계산한다.

제어기에 사용된 변압소자들의 매개변수는 Table 6에서 Isolation 변압소자를 적용하여 계산하였다. 그 결과, π_G 1, λ_{OB} 1.24×10^{-2} , π_{DCO} 0.66, π_{TO} 4.39, λ_{EB} 7.81×10^{-3} , π_{DCN} 1.21, π_{TE} 0.70, λ_{TCB} 8.04×10^{-3} , π_{CR} 6.41, π_{DT} 5.10 및 λ_{IND} 7.63×10^{-4} , 변압소자의 고장률은 3.06×10^{-1} 로 파악되었다.

$$\lambda_P = \pi_G(\lambda_{OB} \pi_{DCO} \pi_{TO} + \lambda_{EB} \pi_{DCN} \pi_{TE} + \lambda_{TCB} \pi_{CR} \pi_{DT}) + \lambda_{IND} \quad (9)$$

여기서,

λ_P : 예측 고장률 π_G : 신뢰도 성장 고장률 승수
 λ_{OB} : 운영 기본고장률 π_{DCO} : 운영사이클 고장률 승수
 π_{TO} : 운영온도 고장률 승수
 λ_{EB} : 외부환경 기본고장률
 π_{DCN} : 반복사이클 고장률 승수(비구동)
 π_{TE} : 외부환경 온도 고장률 승수(비구동)
 λ_{TCB} : 온도사이클 기본고장률
 π_{CR} : 반복고장률 승수 π_{DT} : 온도차 고장률 승수
 λ_{IND} : 유도고장률

Table 6. Parameters of Isolation Transformer

Parameter	Value	Parameter	Value
λ_{OB}	124	Eaop	0.24
$\lambda_{EB} \times 10^{-4}$	78.1	Trdefault	10
λ_{TCB}	80.4	DC1NONOP	0.62
λ_{IND}	7.63	EaNONOP	0.24
β	0	CR1	312
DC1OP	0.38	DT1	29.66

4. 부품 수명예측

부품에 대한 평균고장간격(Mean Time Between Failure, 이하 MTBF)은 식 (10)으로 표현할 수 있으며, 식 (11)를 이용하여 부품의 누적 고장확률이 10%가 되는 시점인 B_{10} 을 산정할 수 있다[12].

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (10)$$

$$B_{10} = -\frac{\ln(1-0.1)}{\lambda}, \lambda: \text{Failure Rate} \quad (11)$$

4.1 기계식 구동장치

IBC EMA의 기계식 구동장치에서 가장 많은 부품을 차지하는 볼트들의 평균수명은 165~173년, B_{10} 은 17~18년으로 파악되었다. 와서는 두께 및 재료에 따라 고장률 및 수명이 결정되는데, EMA에 사용되는 와서의 MTBF는 951년, B_{10} 수명은 100.2년으로 나타났다. 모터는 이중화로 되어 있으며 부품이 서로 상호 구동을 한다. 모터의 고장률을 이용하여 식 (12)에 따라 모터의 수명예측을 수행하였다.

기계식 구동장치의 주요 부품에 대한 수명 예측 결과는 Table 7에 주어졌다.

$$MTBF_{stator} = \frac{1}{\lambda_{stator,1}} + \frac{1}{\lambda_{stator,2}} \quad (12)$$

Table 7. Life Prediction of Main Component in Mechanical Actuator

Location	Failure Rate (λ)	MTBF (years)	B ₁₀ (years)
Driving Part	0.660	173	18
Bolt	0.691	165	17
Resolver /Screw/LVDT	0.12	951	100
Washer	110.35	1	0.1
Motor			

4.2 제어기

제어기에 커패시터는 238개 차지하고 있으며, 커패시터의 종류, 용량 및 정격전압에 따라 고장률과 수명이 달라진다. 커패시터, 트랜지스터 그리고, 변압기에 대한 MTBF와 B₁₀ 수명은 Table 8에 주어졌다.

Table 8. Life Prediction of Main Component in Controller

Type	Capacity /Rated Voltage	Failure Rate (λ)	MTBF (years)	B ₁₀ (years)
Capacitor, fixed, ceramic dielectric type	20uF/50V /5650	0.0085	13,398	1,411
	47uF/10V /3225	0.0097	11,761	1,239
	10uF/50V /3225	0.0086	13,324	1,403
	0.01uF/1kV /3216/COG	0.0164	6,947	732
	0.1nF/1kV /3216	0.0939	1,215	128
Transistor		0.023	4,895	515
Transformer		0.306	372	39

5. 결론

본 논문에서는 블레이드용 전기식 작동기를 구성하는 기계부품과 전자부품의 신뢰성 수명분석을 수행하였다.

기계부품에 대해서는 신뢰성 평가기준인 NSCW-11, 전자부품에 대해서는 217-Plus를 기반으로 실제 사용환경과 제품의 사양을 적용하여 우발고장환경에서 사용하는 경우 주요 부품들의 고장률을 산출하였다. 그리고, 계산된 각 부품의 고장률을 기반으로 MTBF를 이용하여 부

품에 대한 수명과 제품의 누적고장확률이 10%가 되는 시점인 B₁₀ 수명을 계산하여 평가하였다. 그 결과, 구동장치에서는 모터의 MTBF는 1년이고 B₁₀ 수명은 0.1년으로 분석되었다. 그리고, 전자부품은 전압 변압기의 MTBF는 372년, B₁₀ 수명은 39년으로 분석되어 신뢰성 수명이 가장 짧은 것으로 파악되었다. 그러나, 본 논문에서 계산한 고장률은 제품의 우발고장에 해당하기 때문에, 부품의 노후나 마모로 인한 고장을 고려한 수명은 가속수명시험 결과와 사용환경 조건이 반영된 수명모델을 통해서 예측해야 한다. 특히, 기계부품은 부품을 장착하여 구동할 수 있는 시험대를 설계하고 개발하는 것이 중요하고, 전자부품은 전자부품의 특성을 측정할 수 있는 회로를 설계해야 한다. 또한, 기계부품이나 전자부품이 사용되는 환경에서 발생할 수 있는 고장 메커니즘을 분석하여 가속수명시험시 고장 메커니즘에 부합하도록 가속하중을 인가하는 것이 중요하다.

References

- [1] H.B. Lee, K.S. Kim, H.Y. Park, C.M. Yeo, "Development of electric steering control unit for aircraft using DSP-based redundant control system", *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Spring Conference*, Gangwon, Korea, pp.509-513, Apr. 2015.
- [2] S.B. U, M.W. Choi, M.S. Park, E.S. Kim, M.H. Seo, G. Y. Kim, J.C. Lee, S.J. Park, B.J. Min, "Design of electro-mechanical actuator for KSLV-II roll control", *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju, Korea, pp.884-885, Nov. 2017.
- [3] S.J. Lee, H.S. Choi, K.J. Seong, "Automatic flight control system development for optionally piloted vehicle", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.42, No.11, pp.968-973, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2014.42.11.968>
- [4] I.H. Lee, D.H. Kim, M.H. Seo, G.Y. Kim, S.J. Park, M.S. Yang, J.Y. Kwon, "Design analysis & certification test of electro-mechanical actuation system for the flight control used to UAV", *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju, Korea, pp.492-493, Nov. 2016.
- [5] J. Jin, "Dynamic Models of Blade Pitch Control System Driven by Electro-Mechanical Actuator," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.50, No.2, pp.111-118, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.2.111>
- [6] Y.C. Kim, D.H. Kim, S.W. Kim, D. Kim, "Structural Safety Evaluation of Basic Design Model of Linear Actuator for Blade Pitch Control of eVTOL Aircraft",

Journal of Aerospace System Engineering, Vol.16, No.6, pp.106-113, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2022.16.6.106>

- [7] Y.C. Kim, D.H. Kim, S.W. Kim, J.W. Lee, J.H. Kang, D. Kim, "Fatigue Life Evaluation of Electro-Mechanical Actuator for eVTOL Blade Pitch Control Based on Quasi-Static Durability Analysis", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.51, No.5, pp.291-298, 2023.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2023.51.5.291>
- [8] J. Jin, "Blade Pitch Angle Control of VTOL by Aerodynamic Moment Estimation", *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences Fall Conference*, Jeju, Korea, pp.1034-1035, Nov. 2021.
- [9] Radio Technical Commission for Aeronautics, "DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment", RTCA DO-160G, 2014.
- [10] Reliability Information Analysis Center, "Handbook of 217Plus, Reliability Prediction Models", RIAC-HDBK-217Plus, 2006.
- [11] Naval Surface Warfare Center, "Handbook of Reliability Prediction Procedures for Mechanical Equipment", NSWC-11, 2011.
- [12] Korean Agency for Technology and Standards(KATS), "Reliability Terminology Guide", 2003.

한 창 운(Changwoon Han)

[정회원]



- 1993년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (학사)
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (석사)
- 2005년 5월 : U. of Maryland Mechanical Engineering (박사)
- 2005년 4월 ~ 2017년 2월 : 한국전자기술연구원 수석연구원
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국뉴욕주립대 기계공학과 교수

<관심분야>

PoF 기반 신뢰성 예측/해석

김 현 기(Hyun-gi Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (학사)
- 2002년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (석사)
- 2006년 2월 : 서울대학교 기계항공공학부 (박사)
- 2006년 2월 ~ 2007년 12월 : 현대중공업 선임연구원
- 2007년 12월 ~ 현재 : 한국항공우주연구원 책임연구원

<관심분야>

항공기 구조해석, 구조최적화