

블레이드 제어용 전기식 작동기 환경시험 계획

김현기
한국항공우주연구원

Environmental Test Plan of Electro-Mechanical Actuator for Blade Control

Hyun-gi Kim
Korea Aerospace Research Institute

요약 항공기는 날씨 혹은 운행 상황에 따라 다양한 운용 시나리오가 존재한다. 비행 과정에서 먼지나 습도, 염분, 강우 혹은 강설, 저온의 환경과 낮은 압력 등 다양한 환경조건에 노출될 수 있으며, 이륙 또는 착륙 시에는 부품이나 모듈에 진동이나 충격이 발생할 수 있다. 이런 이유로, 항공기는 환경시험을 통해 운용 중에 발생할 수 있는 다양한 환경 조건에 대한 안전성이 검증되어야 한다. 본 연구에서는 전기 수직 이착륙 개인항공기(eVTOL PAV) 적용을 목표로 국내에서 개발 진행 중인 블레이드 제어용 전기식 작동기에 요구되는 환경조건을 검토하고, 그에 대한 환경시험 수행계획을 수립하였다. 이를 위해 항공기 개발 시 환경시험 기준으로 주로 적용되고 있는 DO-160G, IEC 60068, MIL-STD-810 그리고 KS-W 0811에서 규정하고 있는 환경시험 종류와 절차를 조사하고, 각 규격에서 권고하고 있는 환경시험에 대한 수행원칙을 파악하였다. 이를 종합하여 DO-160G를 기반으로 하고, MIL-STD-810, IEC 60068와 KS-W 0811에서 권고하는 환경시험 제반사항을 반영하여 eVTOL 항공기의 블레이드 제어용 전기식 작동기에 대한 환경시험 계획을 수립하였다.

Abstract Aircraft operate under various aircraft operational scenarios depending on the weather or aircraft operational conditions. In particular, an aircraft is exposed to various environmental conditions during flight, such as dusty, humid, saline, and low temperature/pressure environments and rain or snowfall. In addition, the aircraft modules are subjected to vibration or impact during aircraft take-off or landing. Hence, the aircraft's safety against various environmental conditions during aircraft operation must be verified through environmental tests. Notably, this research reviewed the environmental conditions affecting the rotor-blade-controlling electro-mechanical actuator (under development in South Korea) of an electric vertical take-off and landing (eVTOL) personal air vehicle (PAV) and established an environmental test plan for this electro-mechanical actuator. In particular, this research reviewed the environmental test items and procedures stipulated in the aircraft development's mainly used environmental test standards: DO-160G, IEC 60068, MIL-STD-810, and KS-W 0811 and identified the performance principles for environmental tests recommended in these standards. Finally, the environmental test plan for the rotor-blade-controlling electro-mechanical actuator of an eVTOL PAV was established based on the DO-160G after reflecting on the environmental test requirements recommended by the above-mentioned standards.

Keywords : Blade Control, DO-160G, Electro-Mechanical Actuator, Environmental Test, IEC 60068, KS-W 0811, MIL-STD-810

본 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT)의 연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호 20015907, eVTOL 모빌리티 용 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 17, 2022

Revised April 19, 2022

Accepted June 3, 2022

Published June 30, 2022

1. 서론

항공기는 날씨 혹은 운항상황에 따라 비, 모래, 먼지, 그리고 염분과 압력변화 등의 영향을 받게 된다. 또한, 이착륙 시에는 항공기에 진동이나 큰 충격이 작용할 수 있다. Fig. 1은 항공기가 운행하면서 항공기의 고장에 영향을 미치는 주요 환경요인들이다. 항공기는 이러한 환경요인들에 대해서 안전성이 확인되어야 한다. 이런 이유로, 무인항공기 운용 환경조건 시험절차[1], 고정익항공기의 환경 요구사항[2,3], 회전익항공기의 환경조건 고찰[4], 항공기 부품에 대한 환경시험 기반 연구[5,6] 등 항공기 관련 환경시험 수행방안에 대한 연구가 다수 진행되어 왔다.

본 연구에서는 eVTOL(electric vertical take-off and landing) 항공기 적용을 목표로 국내에서 개발 중인 블레이드(blade) 제어용 전기식 작동기(electro-mechanical actuator)에 대한 환경시험 수행계획을 수립하였다. 이를 위해 DO-160G, MIL-STD-810, IEC 60068 그리고 KS-W 0811에서 규정하고 있는 환경시험 규정과 절차를 분석하고 각 규격서의 환경시험 수행원칙을 파악하였다. 그리고, DO-160G를 기반으로 해서 해외전문업체의 권고사항과 각 환경시험 규격서들의 수행원칙을 반영하여 eVTOL 항공기의 블레이드 제어용 전기식 작동기에 대한 환경시험 계획을 수립하였다.

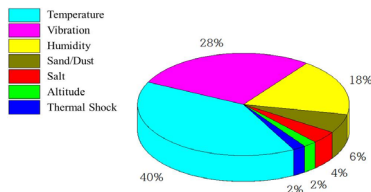


Fig. 1. Environmental Factors Affecting Failure[7]

2. 본론

2.1 환경시험 규격 소개

항공기에 탑재되는 장비에 대한 환경시험 기준 및 표준절차는 비영리기관인 Radio Technical Commission for Aeronautics(RTCA)에서 발행한 DO-160G[8], 미국방부 환경시험 표준인 MIL-STD-810[9], International Electrotechnical Commission(IEC)에

서 발간한 IEC 60068[10], 한국산업표준에서 발행한 KS-W 0811[11]이 사용된다.

DO-160G는 주로 민수용 항공기와 부품에 적용되는 환경시험 규격으로써, 11개의 환경시험과 12개의 전자파 적합성 시험으로 구성되어 있고, 군수용 규격인 MIL-STD-810G는 기후적 환경과 기계적 환경에 관련된 총 26가지의 시험항목으로 구성되어 있다.

IEC 60068은 극한의 추위와 열을 포함한 환경조건에서 전기, 전자장비 및 제품의 성능을 평가하기 위한 환경시험 규격이다. IEC 60068은 세 부분으로 구성되어 있는데, IEC 60068-1은 일반사항 및 지침, IEC 60068-2는 환경시험 방법, IEC 60068-3은 지원문서 및 지침에 대한 내용이다. 참고로, 한국의 KS에서는 IEC 60068과 같은 KS C IEC 60068을 사용한다.

KS-W 0811은 항공우주기기의 운용시나리오 분석을 위한 국내 시험규격으로써, 자연환경 및 유기환경이 주는 영향에 대해 항공우주기기의 저항성을 판정하기 위한 시험방법과 재현성이 있는 시험결과가 얻어질 수 있는 환경시험 방법을 규정하고 있다.

Table 1에서 각 규격서들의 특징을 간단히 정리하였고, Table 2와 3에서는 각 규격서에 규정되어 있는 기후적 환경시험과 기계적 환경시험을 비교하였다. DO-160G를 기준으로 비교했을 때, 기후적 환경시험에서 IEC 60068은 결빙시험, KS-W 0811은 유체오염시험과 결빙시험이 규정되어 있지 않다. 반면에 MIL-STD-810은 DO-160G에서 규정하고 있는 모든 시험을 포함하고 있음을 확인할 수 있다.

Table 1. Comparison of Specification for Environmental Test

Title	Characteristic
DO-160G	A standard for testing aviation-related equipment issued by RTCA. Applied to helicopters, general airplanes and equipment used in aircraft
MIL-STD-810	Applied to evaluate the suitability of military equipment as an environmental test standard established by the US Department of Defense.
IEC 60068	Environmental test standard established by IEC, and is applied to general electrical and electronic components and equipment.
KS-W 0811	Domestic test standards to analyze operation scenarios of aerospace equipment

Table 2. Comparison of Environmental Test of DO-160G, IEC 60068 and KS-W 0811

RTCA/DO-160G	IEC 60068	KS-W 0811
Climatic Environment Test		
• temperature and altitude	• cold • dry heat • low air pressure	• low pressure • low temperature • high temperature
• temperature variation	• change of temperature	• thermal shock
• humidity	• humidity cyclic test	• humidity
• waterproofness	• immersion	• immersion
• fluids susceptibility	• fluid contamination	n/a
• sand and dust	• dust and sand	• dust
• fungus resistance	• mould growth	• fungus
• salt fog	• salt mist	• salt/Spray
• icing	n/a	n/a
Mechanical Environment Test		
• operational shocks and crash safety	• shock	• shock
• vibration	• vibration	• vibration

Table 3. Comparison of Environmental Test of DO-160G and MIL-STD-810

RTCA/DO-160G	MIL-STD-810
Climatic Environment Test	
• temperature and altitude	• low pressure(altitude) • low temperature • high temperature
• temperature variation	• temperature shock
• humidity	• humidity
• waterproofness	• immersion
• fluids susceptibility	• contamination by fluids
• sand and dust	• sand and dust
• fungus resistance	• fungus
• salt fog	• salt fog
• icing	• icing/freezing rain
Mechanical Environment Test	
• operational shocks and crash safety	• acceleration • shock
• vibration	• vibration

2.2 환경시험 수행원칙

일반적으로 항공기 부품은 단일 환경보다 다양한 복합 환경요인에 노출되므로, 단일 환경시험만을 수행하는 경우 다양한 환경적 요인에 의한 항공기 부품의 내환경성을 판단하는데 한계가 있다. 따라서, 다양한 환경조건에 대한 항공기 부품의 구조 안전성과 신뢰성을 파악하기 위해서는 복합 환경시험의 수행이 필요하며, 이를 위해

복합 환경시험 내에서 시험순서를 결정하는 것이 중요하다. 다음은 각 환경시험 규격서에서 규정하고 있는 환경 시험에 대한 수행원칙이다.

2.2.1 RTCA DO-160G

DO-160G에서는 단일시험 품목에 대해 아래 사항을 참고하여 실시하도록 권고하고 있다.

- a. 곰팡이 저항성(fungus resistance) 시험 전, 염수 분무(salt fog) 시험은 지양한다.
- b. 곰팡이 저항성(fungus resistance), 염수 분무(salt fog)시험 또는 습도(humidity)시험 전, 모래와 먼지(sand and dust) 시험은 지양한다.
- c. 다른 DO-160G 시험 전, 가연성(fire, flammability) 시험은 지양한다.
- d. DO-160G 시험 전, 폭발성 대기시험은 지양한다.

2.2.2 MIL-STD-810

MIL-STD-810은 미국방부에서 국방관련 제품들의 납품을 위해 만들어놓은 시험인증 규격으로써, 미국 등 세계 여러나라에서 군용제품의 적용성 검토에 사용되고 있는데, 시험조건이 매우 까다롭고 오랜 시험기간을 요구한다.

MIL-STD-810은 세 부분으로 구성되어 있는데, part I은 환경설계와 시험과정에서의 관리, 엔지니어링 및 기술의 역할에 대해서 기술하고 있으며, part II는 일반적인 시험구체적인 시험방법을 기술한다. 그리고 part III는 다양한 기후에서 사용되는 군수품과 물자들의 연구, 개발, 시험평가들에 대해서 현실적으로 고려해야 할 지침을 제공한다.

환경시험 수행순서에 대한 사항은 part II에서 언급하고 있는데, 각 시험항목 별로 해당시험 전/후에 수행하는 시험에 대한 대략적인 가이드라인을 제시하고 있다. Table 4는 MIL-STD-810에서 각 시험별 전·후시험에 대한 가이드라인을 정리한 것이다.

Table 4. Test Recommendations in MIL-STD-810

Test	Previous Test	Post Test
altitude	vibration, shock, high temperature	n/a
low/high temperature	vibration, shock,	n/a
contamination by fluids	climatic environment	n/a

humidity	n/a	salt fog, sand and dust, fungus
fungus	n/a	salt fog, sand and dust
salt fog	(if necessary) fungus, humidity	sand and dust
sand and dust	n/a	n/a
immersion	n/a	n/a
acceleration	high temperature	n/a
vibration	n/a	n/a
shock	vibration, temperature	n/a
icing/freezing	n/a	salt fog

2.2.3 IEC 60068

IEC 60068에서는 환경시험 수행과 관련하여 다음과 같이 명시하고 있다.

- a. 온도변화에 따라 발생할 수 있는 균열을 파악하기 위해서 온도 관련 시험을 가장 먼저 실시하고, 그 후 진동 및 충격시험을 수행한다.
- b. 온도, 진동, 충격시험의 영향은 기압시험 및 온습도 사이클 시험을 통해 습기가 시료의 균열 내에 들어감으로써 발현될 수 있다. 필요한 경우, 균열이나 누설 검출을 위해 밀봉시험을 실시할 필요가 있다.
- c. 습한대기에서 부품의 장기간 양상을 확인하기 위한 내습성 시험은 전체 시험의 종료시 또는 순서에 없는 경우에는 각각의 시료에 적용할 수 있다. 또한, 모래와 먼지시험은 습기가 존재하는 상태에서 시료를 부식시키거나 기준에 발생한 고장을 더욱 성장시킨다.

Fig. 2는 위의 권고사항을 바탕으로 수립된 환경시험 수행계획의 예를 보여주고 있다.

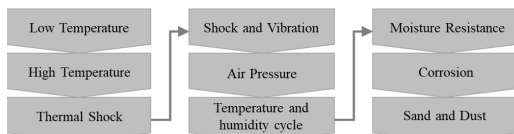


Fig. 2. Environmental Test Plan based on IEC 60068[5]

2.2.4 KS-W 0811

Table 5와 6은 KS-W 0811에서 권장하는 시험 절차를 나타낸다. Group 1에서 A는 일반 기지용(업페) 및 C/D/E에 해당하지 않는 모든 지상기기, B는 일반 기지용(비업페) 및 C/D/E에 해당하지 않는 모든 지상기기,

C는 항공기 및 비상체용 지원기재, D/E는 모든 통신기기 및 전자기기, 전기회로를 가진 기기가 해당된다.

Group 2에서 a는 보조동력장치 및 동력 장치용 보조 부품, b는 액체계통, c는 기체계통, d는 전기기기, e는 기계장치, f는 자동 조종장치, 자이로 및 유도장치, g는 지시계, 전기계기, 신호장치 등을 포함하는 계기류, h는 무장, i는 사진장치 및 광학기기, j는 전자기기 및 통신기기가 해당된다. 참고로, Table 5와 6에서 Group 1과 Group 2의 각 시험항목의 숫자는 시험 수행순서를 의미하며, 본 연구에서 다루고 있는 전기식 작동기는 Group 1의 D, Group 2의 d, e에 해당된다. 그리고, 시험순서에 붙인 주기부호()는 다음을 의미한다. (1)한정 적용되는 시험 (2) 항공기 탑재 비행체 또는 지상발사 비행체에는 적용되지 않는 시험 (3)지상발사 비행체에는 통상 적용되지 않는 시험

Table 5. Test Procedure of Group 1&2 in KS-W 0811

Test	Group 1					Group 2		
	A	B	C	D	E	a	b	c
high temperature	1	1	1	2	2	1	1	1
low temperature	2	2	2	1	1	2	3(1)	2
temperature-altitude	-	-	-	-	-	3(3)	2(3)	3(3)
humidity	4	4	3	6	6	5	4(1)	4
salt and spray	5(1)	5	4	7(1)	7	6(1)	5(1)	5(1)
dust	3(1)	3	5	3(1)	3	4	6(2)	6(2)
vibration	7	7	7	5	5	8	8	8
shock	6	6	6	4	4	7	7	7
temperature-humidity-altitude	-	-	-	-	-	9(1)	9(1)	9(1)

Table 6. Test Procedure of Group 2 in KS-W 0811

Test	Group 2						
	d	e	f	g	h	i	j
high temperature	2	1	1	1	1	1	2
low temperature	1	2	2	2	2	2	1
temperature-altitude	3(3)	3(1,2,3)	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)	3(3)
humidity	5	4	4	5	4	4(1)	7
salt and spray	6(1)	5(1,2)	5(1)	6(1,2)	5(2)	5(1,2)	8(1,2)
dust	4	6	6	4	6	6(2)	4
vibration	8	8	8	7	8	8	6
shock	7	7	7	8	7	7	5
temperature-humidity-altitude	9(1)	9(1)	9(1)	9(1)	9(1)	9(1)	9(1)

2.3 환경시험 계획(안)

Table 7은 DO-160G에서 규정하고 있는 환경시험 항목과 각 항목의 요구조건들을 보여주고 있다. 각 시험 항목에는 요구조건에 따른 시험 카테고리(온도, 고도, 습도, 진동 및 충격, 모래먼지, 염수분무 등)의 적용을 권고하고 있다. 그리고, 각 규격서의 권고사항을 검토한 결과, 환경시험 계획을 수립하기 위해 반영한 사항은 다음과 같다.

- a. IEC 60068, KSW 0811의 권고사항에 따라 온도 관련 시험을 가장 먼저 수행한다.
- b. MIL-STD-810에 따라 고도시험 수행 전에 진동시험을 수행하고, 이 후 충격시험을 수행한다.
- c. MIL-STD-810에 따라 습도시험 수행 후에 염수분무 시험을 수행한다.
- d. DO-160G, IEC 60068, MIL-STD-810의 권고사항을 반영하여 모래먼지 시험은 습도시험과 염수분무 시험을 수행한 후 마지막에 수행한다.

위의 사항을 종합하여, 본 연구에서는 Table 8과 같이 DO-160G를 기반으로 하고 해외 전문업체에서 권고하는 시험항목과 MIL-STD-810, KS-W 0811, IEC 60068의 환경시험 수행원칙을 반영하여 eVTOL 항공기의 블레이드 제어용 전기식 작동기에 대한 환경시험 수행계획을 수립하였다.

Table 7. Test Requirements Specified in DO-160G

Section	Test	Category
4	temperature and altitude	<ul style="list-style-type: none"> • Category A : -15~70°C(-55~85°C), lower than 4,600m • Category B : -15~70°C(-55~85°C), lower than 4,600m
5	temperature variation	<ul style="list-style-type: none"> • Category A: 10°C/Min • Category B: 5°C/Min • Category C: 2°C/Min
6	humidity	<ul style="list-style-type: none"> • Category A: standard humidity, relative humidity 85±4%~95±4%, 48hour • Category B: harsh humidity, relative humidity 85±4%~95±4%, 240hour
7	operational shocks and crash safety	<ul style="list-style-type: none"> • operational shocks: 11ms, 20ms • crash safety: impulse, continuous test
8	vibration	<ul style="list-style-type: none"> • Category S : vibration in normal operation

10	waterproofness	<ul style="list-style-type: none"> • Category Y : normal operation, condensed water • Category W : normal operation, falling water • Category R: rain while operation • Category S: icing/washing/fluid load
12	sand and dust	<ul style="list-style-type: none"> • Category D: sand • Category S: dust
13	fungus	<ul style="list-style-type: none"> • direct attack on materials • indirect attack on materials
14	salt fog	<ul style="list-style-type: none"> • Category S : corrosion exposure during normal operation • Category T: hovering near the sea

Table 8. Environmental Test Plan for Electro-Mechanical Actuator

Test Sequence.	Test	Requirement	Test Category
1	temperature	DO-160G, Sec.4	Category A1/A2
2	vibration	DO-160G, Sec.8	Category S
3	shock	DO-160G, Sec.7	Category A/B
4	altitude	DO-160G, Sec.4	Category A1/A2
5	humidity	DO-160G, Sec.6	Category B
6	salt fog	DO-160G, Sec.14	Category S
7	sand and dust	DO-160G, Sec.12	Category D, S

3. 결론

본 논문에서는 eVTOL 항공기 적용을 목적으로 국내에서 개발 중인 블레이드 제어용 전기식 작동기에 대한 환경시험 수행계획을 수립하였다. 이에 대한 구체적인 사항은 다음과 같다.

첫째, DO-160G, MIL-STD-810, IEC 60068 그리고, KS-W 0811에서 제시하는 환경시험 규정과 절차를 파악하였다.

둘째, 각 규격서에서 권고하는 환경시험 수행원칙에 대해 검토하였다.

셋째, 이를 종합하여 해외 전문업체에서 해당 항공기 개발에 적용을 권고하고 있는 DO-160G를 기반으로 전기식 작동기에 대한 환경시험 계획을 수립하였다.

References

- [1] S. Yun, "A Study on the Establishment of Environmental Test Procedures for the UAV," *Journal of Aerospace System Engineering*, Vol.13, No.3, pp.87-94, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.20910/JASE.2019.13.3.87>

- [2] J.S. Kim, "A study on the Tailoring of Environmental Requirements for XKT-1T Aircraft," *Journal of the Korean Society of Systems Engineering*, Vol.17, No.1, pp.97-106, 2021.
DOI: <https://doi.org/10.14248/JKOSSE.2021.17.1.099>
- [3] J.M. Park, J.W. Lee, R.S. Myong, "Environmental Test Tailoring for Fighter Aircraft Intended for Operating in Korean Peninsula," *The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol.47, No.5, pp.344-357, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5139/JKSAS.2019.47.5.344>
- [4] J.H. Jang, D.H. Lee, J.H. Choi, S.C. Oh, J.S. Jang, "Research Issue in Environmental Condition of Radio Frequency Compatibility Assessment to Telecommunication Equipment on Rotary-wing Aircraft," *KSAS 2016 Spring Conference*, pp. 860-863, 2016.
- [5] J.H. Yang, Y.S. Kim, "A study on an Environmental Test Sequence for Electrical Units on Aircraft," *Journal of Applied Reliability*, Vol.14, No.2, pp.114-121, 2014.
- [6] S.W. Cho, G. Moon, J. Jo, "Study on Environmental and Electromagnetic Compatibility Test for Aircraft Parts & Components," *KSAS 2016 Fall Conference*, pp.616-617, 2016.
- [7] J.W. Park, J.H. Lee, J.G. Ham, M.H. Jung, S.H. Mo, D.H. Lee, M.S. Kim, "Design of Environmental Tests," *Journal of Applied Reliability*, Vol.5, No.3, pp.301-314, 2005.
- [8] Radio Technical Commission for Aeronautics, "DO-160, Environmental Conditions and Test Procedures for Airborne Equipment," 2014.
- [9] U.S. Army Developmental Test Command, "MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard: Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests," 2008.
- [10] International Standard, "Environmental testing-Part 1: General and guidance," International Electrotechnical Commission, ISBN 978-2-8322-1110-6, 10 2013.
- [11] Korean Standards Association, "Environmental test methods for aerospace equipment," KS-W 0811, 2004

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, 유체-구조 연성해석