

항공기용 배터리 충전제어기 IGBT 열화 원인 분석 및 개선에 관한 연구

박상훈¹, 김세운¹, 김정민^{1,2*}
¹국방기술품질원, ²경상대학교 전자공학과

A Study on the Analysis and Improvement of IGBT Deterioration Causes of Battery Charge Controller for Aircraft

Sang-Hoon Park¹, Se-Un Kim¹, Jung-Min Kim^{1,2*}
¹Defense Agency for Technology and Quality,
²Department of Electronic Engineering, Gyeongsang National University

요약 초음속 항공기에 사용되는 배터리 충전 유니트(BCCU)는 항공기 주전원 고장시 비행제어 시스템 컴퓨터를 포함하여 각종 전자장비에 배터리 전원을 공급할 수 있도록 제어하는 역할을 수행하며, 비행 안전성 확보를 위해 매우 중요한 장비이다. 초음속 항공기 운용 중 BCCU 내부에서 전원 Switching 역할을 수행하는 절연 게이트 양극성 트랜지스터(Insulated Gate Bipolar Transistor, 이하 IGBT) 열화로 인해 배터리 충전에 문제가 발생하였다. IGBT는 MOSFET과 BJT의 장점을 결합시킨 트랜지스터로서, MOSFET만큼 스위칭 속도가 빠르고, BJT와 같이 고압 고전류에서의 전력 손실이 적어 BCCU 회로구성에 필수적인 소자이다. 전원회로 구성에 필수적인 IGBT 열화 현상을 개선하기 위해 IGBT 발열, 열화의 원인이 되는 IGBT 스위칭 손실(Switching Loss), 전도 손실(Conductive Loss)에 대해 분석하였으며, 원인 분석결과를 바탕으로 IGBT 주변회로를 분석, 측정하여 전압을 변환하는 역할을 수행하는 구동변압기(Drive Transformer) 용량 저하에 의한 전력손실, IGBT 온도증가를 확인하였다. 구동변압기 용량에 따라 전력 손실, IGBT 온도 상승률은 각각 0.24J, 1°C/min이 증가하였고 이로 인해 IGBT 열화 현상이 발생하였다. 이를 개선하기 위해 구동변압기 용량 및 관리방안을 개선하였으며, 고온/저온 주기 시험, BCCU 동작확인을 통해 개선안을 입증하였다.

Abstract The battery charging unit used in supersonic aircraft controls the supply of battery power to various electronic equipment, including flight control system computers, and is critical to flight safety in the event of main power failure in an aircraft. During supersonic aircraft operations, the deterioration of insulated gate bipolar transistors (IGBTs) that act as power switching inside BCCU has caused battery charging problems. The IGBT is a transistor that combines the advantages of MOSFET and BJT, which is essential for BCCU circuit construction because of its fast switching speed and low power loss at high voltage and high currents. To improve IGBT degradation, which is essential for power circuit construction, IGBT heating, switching loss, and conductive loss were analyzed. Based on cause analysis, IGBT peripheral circuits were analyzed and measured to confirm the IGBT capacity degradation. The power loss and IGBT temperature increase rates increased by 0.24J and 1°C/min, respectively, depending on the capacity of the drive transformer, resulting in IGBT deterioration. The drive transformer capacity and management method were improved. The improvement plan was demonstrated through high-temperature/low-temperature cycle testing and BCCU behavior verification.

Keywords : IGBT, Deterioration, BCCU, Drive Transformer, IGBT Circuit

*Corresponding Author : Jung-min Kim(Defense Agency for Technology and Quality, Gyeongsang National University)
email: doesi1029@naver.com

Received July 13, 2021

Revised July 26, 2021

Accepted October 1, 2021

Published October 31, 2021

1. 서론

항공기 구성품 동작에 필수적인 직류, 교류 전력을 공급하는 전기계통의 전원공급 불안, 불량은 비행기 사고 및 인명피해를 유발한다. 전원공급 불량에 의한 사고를 방지하기 위해 방위사업청 군용항공기 표준감항인증기준에 관한 고시에 따르면, 단일 엔진, 발전기 단일 결합에 의한 전기공급 차단을 방지하기 위해 주전원(발전기)의 불량에서도 배터리(비상전원)는 30분 이상 비행 필수 장비에 전원을 공급할 수 있어야한다고 규정하고 있다[1].

이와 같이 비상시 비행 필수 장비에 전력을 공급하기 위한 항공기 배터리 시스템은 Fig. 1과 같이 배터리, 배터리 충전 유니트(Battery Charger-Control Unit, 이하 BCCU)로 구성된다. BCCU는 주전원 고장으로 인한 비상전력 공급 필요시 비행제어 시스템 컴퓨터를 포함한 비행 필수 장비에 비상전력을 공급할 수 있도록 제어하는 역할을 수행한다[2].

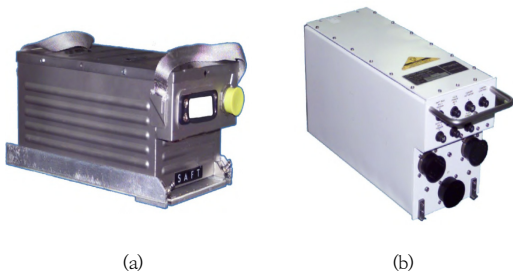


Fig. 1. Aircraft Battery System
(a) Battery for Aircraft, (b) Battery Charger-Control Unit

이와 같이 비행 안정성 확보에 필수적인 BCCU는 전원 공급을 위해 Fig. 2와 같이 절연 게이트 양극성 트랜지스터(Insulated Gate Bipolar Transistor, 이하 IGBT) 사용이 요구된다.

IGBT는 금속 산화막 반도체 트랜지스터(Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor, 이하 MOSFET)과 양극성 접합 트랜지스터(Bipolar Junction Transistor, 이하 BJT)의 장점을 결합시킨 트랜지스터로서, MOSFET만큼 스위칭 속도가 빠르고, BJT와 같이 고압 고전류(High Voltage and High Current)에서의 전력손실이 적다[3-5]. 기존 MOSFET과 BJT로 구성하지 못했던 시스템을 IGBT로 구성할 수 있게 됨으로써 산업용 컨버터에서 가전제품에 이르기까지 적용분야가 점차 확대되고 있다[6,7].

JEDEC STYLE TO-247

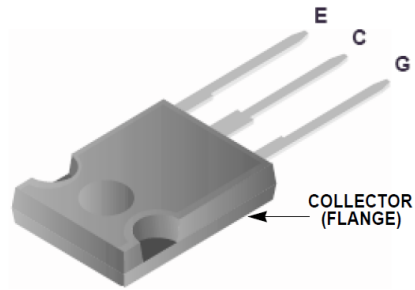


Fig. 2. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

이러한 장점에도 불구하고 IGBT는 발열량이 많은 단점을 가진다. 보고된 바에 의하면, IGBT의 발열은 소자의 성능을 떨어뜨리고 패키지 모듈의 열 기계적 변형을 발생시켜 균열(Crack) 및 파괴(Fracture)를 초래하며 신뢰성 문제를 야기한다[8-10].

이러한 균열 및 파괴의 원인은 재료마다 서로 다른 열팽창계수(Coefficient of Thermal Expansion)를 갖기 때문인데, 온도가 변함에 따라 재료는 팽창과 수축을 반복하게 되고 재료간의 열팽창계수 차이로 인해 열응력(Thermal Stress)이 축적된다. 결국, 열응력에 의한 열피로(Heat Fatigue)가 한계치에 도달하면, 재료는 균열 및 파괴가 발생하고 IGBT 모듈은 수명(Lifetime)을 다하게 된다[11].

이와 같은 열피로 발생 메커니즘(Mechanism)에 의해 BCCU 내부 IGBT의 열화 현상이 발생하였고, 이로 인해 배터리 충전 관련 경고인 BATT FAIL 경고가 다수의 항공기에서 시험되었다. 이는 비상시 30분간 전원을

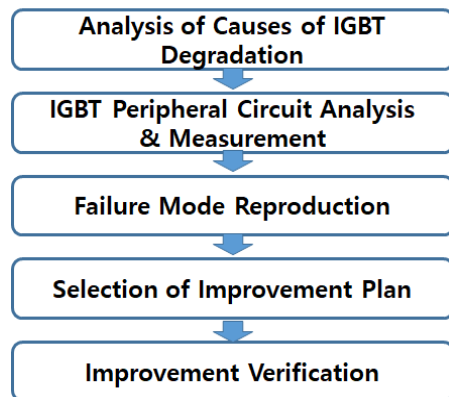


Fig. 3. Study Flow Chart

공급해야하는 항공기 비상전력공급 계통의 치명적인 문제로 비행 안정성 확보에 치명적이며 즉각적인 원인분석 및 개선이 요구되었다.

본 연구에서는 체계적인 원인분석 및 개선을 위해 Fig. 3과 같이 IGBT 열화 원인 분석, IGBT 주변회로 분석 및 측정, 고장모드 재현, 개선안 도출 및 검증의 순서로 연구를 진행하였다.

2. 고장현상 원인분석

2.1 IGBT 열화 원인 분석

Fig. 4와 같이 IGBT 열화현상이 발생한 BCCU는 MIL-STD-704에 따른 115Vac의 3상 전원을 직류 전원으로 변환하여 배터리를 충전하는 역할을 수행하며, 전력 변환을 위해 IGBT의 대전력 스위칭(Switching)이 필요하다[12].

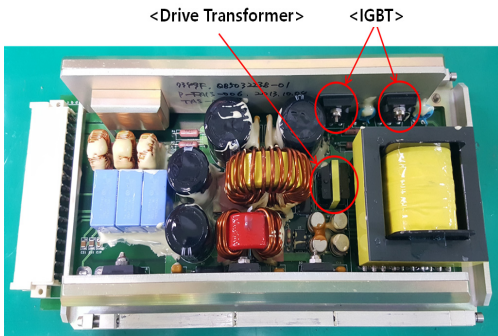


Fig. 4. BCCU Circuit Ass'y

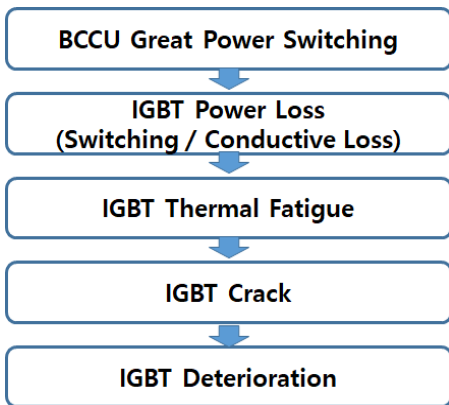


Fig. 5. IGBT Deterioration Mechanism

IGBT 열화현상은 Fig. 5과 같은 흐름에 의해 발생한다. 먼저, BCCU 동작을 위한 대전력 스위칭(Grate Power Switching) 과정에서 발생한 전력 손실은 발열, 열피로(Thermal Fatigue)를 유발한다. 이와 같은 열피로가 한 계치에 도달하게 되면, IGBT 내부 균열 및 파괴가 발생하며, IGBT는 열화(Deterioration) 즉 Lifetime)을 다하게 된다[13].

2.2 IGBT 전력 손실

IGBT 전력 손실은 Eq. 1과 같이 스위칭 손실(Switching Loss) 전도 손실(Conduction Loss)의 합으로 계산된다.

$$P_{loss} = P_{conductive\ loss} + P_{switching\ loss} \quad (1)$$

IGBT 열화를 유발하는 첫 번째 인자인 전도 손실은 Eq. 2와 같이 Vce와 Ic의 곱으로 계산된다. 이는, Fig. 6과 같이 IGBT 문턱전압(Threshold Voltage)이상의 Vge가 인가된 IGBT On 상태에서 지속적으로 발생하는 전력 손실로, Vce, Ic에 비례하여 증가/감소하는 특징을 가진다[14].

$$P_{conductive} = V_{ce(sat)} \cdot I_c \quad (2)$$

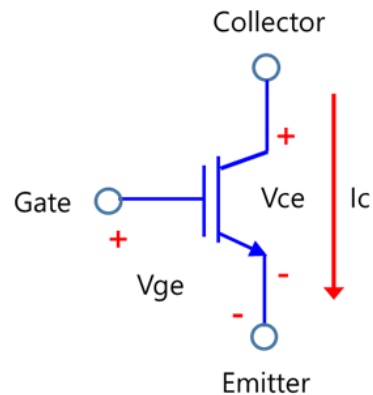


Fig. 6. IGBT Conductive Loss

IGBT 열피로를 유발하는 두 번째 인자인 스위칭 손실은 Fig. 7와 같이 붉은색으로 표시된 기생 커패시턴스(Stray-Capacitance) 성분에 의해 발생한다.

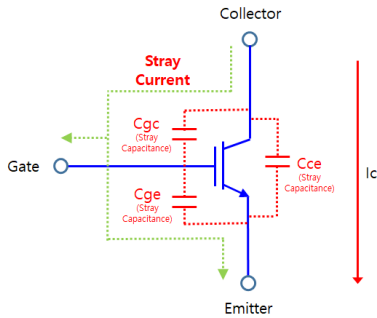


Fig. 7. IGBT Stray Capacitance

IGBT의 기생 커패시턴스 성분은 Fig. 8과 같이 IGBT 내부 P형 반도체, N형 반도체의 PN 접합에 의해 발생하는 콜렉터(Collector)-에미터(Emitter) 사이의 기생 커패시턴스 성분 Cce, Gate 부근의 실리콘 산화물(Silicon Oxide)로 인해 발생하는 게이트(Gate)와 에미터(Emitter), 콜렉터(Collector) 사이의 Cgc, Cge로 구성된다.

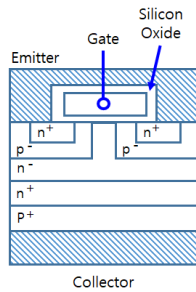


Fig. 8. IGBT Structure

이와 같은 불필요한 기생 커패시턴스 성분은 IGBT 스위칭시 Fig. 7의 녹색선과 같이 불필요한 전류 경로(Stray Current Path)를 만들게 되고 이는 전력손실 및 발열을 유발한다[13].

일반적으로 기생 커패시턴스 성분 때문에 스위칭 손실인 Turn-On, Turn-Off 손실은 IC 제조사별, 패키지(Package) 방식 별로 상이하며, 이에 따라 IC 제조사들은 스위칭 손실에 대해 Datasheet를 제공하고 있다.

본 연구에 사용된 IGBT의 Datasheet에 따르면 Fig. 9와 같은 Turn-on 손실은 Tj(Junction-Temperature, 정션온도), 게이트와 에미터 사이의 전압 Vge, 콜렉터와 에미터 사이의 전류 Ice가 증가 할수록 커지는 특성을 가진다. Fig. 10과 같은 Turn-off 손실은 콜렉터와 에미터 사이 전류 Ice가 클수록, Tj(Junction-Temperature) 증가하는 특징을 가진다[14].

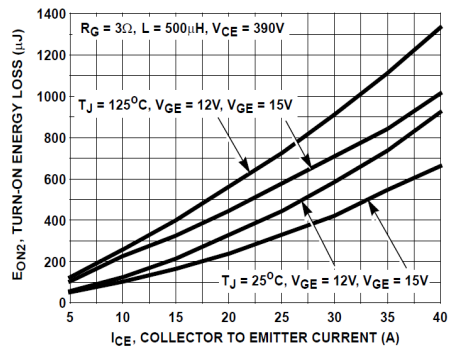


Fig. 9. Turn-on Energy loss vs Collector to Emitter Current

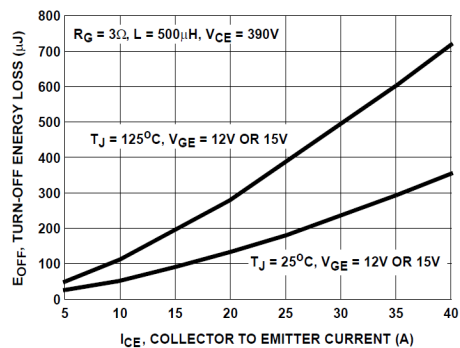


Fig. 10. Turn-off Energy loss vs Collector to Emitter Current

따라서 IGBT의 열화 현상은 Eq.1과 같은 IGBT 스위칭 손실, 전도 손실에 의한 전력손실로 인한 열피로로 인해 발생하며, 전력손실은 Vce, Ic, Tj에 비례, Vge에 반비례하여 증가한다.

2.3 IGBT 주변회로 분석 및 측정

2.1에서 수행한 원인분석결과에 따라 IGBT 주변회로 분석을 실시하였다. IGBT 주변회로는 Fig. 11과 같이 IGBT 게이트 단의 입력부, IGBT 에미터, 콜렉터단의 출력부로 나누어진다.

IGBT 입력부에서는 게이트단의 입력전압을 인가해주는 회로구성이 필요하며, 1차측의 전원을 변환하는 구동 변압기(Drive Transformer), 변환된 전원은 저항으로 구성된 전압분배회로(Voltage Divider Circuit)를 통해 게이트에 전압이 인가된다.

IGBT 출력부에서는 콜렉터, 에미터의 오버슈트(Overshoot), 언더슈트(Undershoot)와 같은 스파이크(Spike) 전압을 감쇄시키기 위한 RC 스너버(Snubber) 회로로 구성된다.

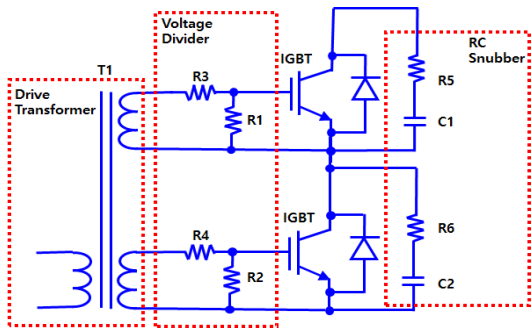


Fig. 11. Turn-off Energy loss vs Collector to Emitter Current

이와 같이 IGBT 전원 스위칭을 위해 IGBT 주변에 실장된 구동변압기(Drive Transformer), 저항, 커패시터 (Capacitor) 등이 설계치대로 실장 되었는지 확인하기 위해 디지털 멀티미터, LCR Meter와 같은 측정장비를 이용 소자의 정격, 측정값을 Table 1과 같이 정리하였다.

Table 1. Result of IGBT Peripheral Circuit

Part No	Rated Capacity	Measured Capacity	Result
T1 (Transformer)	540 μ H(\pm 20%)	430 μ H	Lower Specification
R1, R2 (Resistor)	1k Ω (\pm 10%)	1k Ω	Normal
R3, R4 (Resistor)	6.8 Ω (\pm 10%)	6.8 Ω	Normal
R5, R6 (Resistor)	12 Ω (\pm 10%)	12 Ω	Normal
C1, C2 (Capacitor)	3300pF(\pm 10%)	3300pF	Normal

측정결과 IGBT의 입력부에 실장된 구동변압기는 전압변환을 위해 540 μ H(\pm 20%)를 만족해야하나 구동변압

기 오차범위 중 규격하한치에 해당하는 430 μ H로 측정되었으며, 이에 따른 영향성 분석이 필요하였다.

구동변압기 용량 저하에 따른 IGBT 영향성 파악을 위해 정격용량 540 μ H의 하한치에 가까운 430 μ H, 정격값인 540 μ H, 상한치에 가까운 650 μ H 총 3가지 변압기를 시험 대상으로 선정하여 구동변압기 용량에 따른 IGBT 입력전압 V_{ge} 를 측정하였다.

구동변압기 용량에 따른 IGBT의 입력전압(V_{ge}) 측정 결과는 Table 2와 같다. 구동변압기 용량 430 μ H에서 11.37V, 540 μ H에서 11.8V, 650 μ H에서 12.13V가 측정되었으며, 구동변압기 용량에 따라 V_{ge} 가 감소하는 것을 확인하였다.

2.4 구동변압기 용량에 IGBT 스위칭 손실

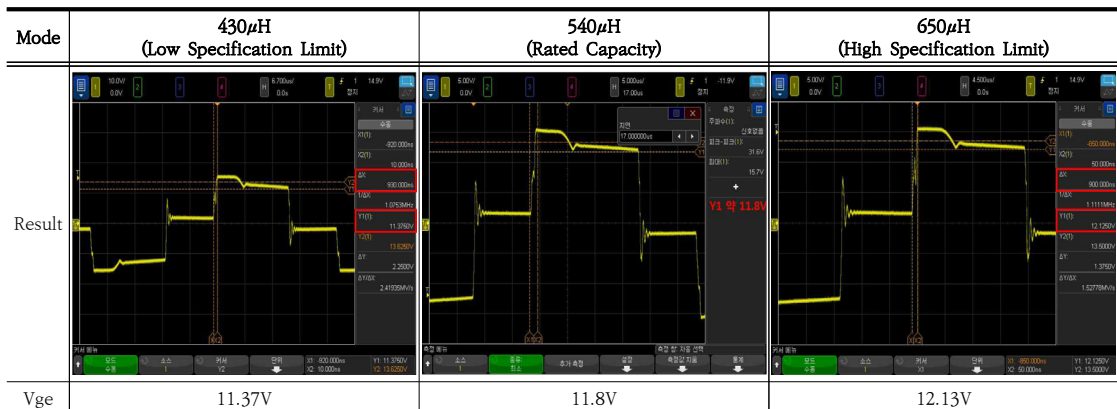
Fig. 9, Fig. 10과 같이 IGBT 제조사에서 제공한 Datasheet에 따른 스위칭 손실 측정 결과는 Table 3과 같다.

IGBT Turn-on 손실은 430 μ H, 540 μ H, 650 μ H(@25 $^{\circ}$ C,12A)에서 200 μ J, 190 μ J, 180 μ J로 측정되었으며, Turn-off 손실(@25 $^{\circ}$ C,12A)은 3가지 케이스 모두 80 μ J로 측정되어 구동변압기 용량이 증가할수록 스위칭 손실이 감소하는 것을 확인하였다.

Table 3. IGBT Switching Loss

Drive Transformer	V_{ge}	Switching Loss		Difference Power Loss (Compare to 430 μ H)
		Turn-on Loss	Turn-off Loss	
430 μ H	11.37V	200 μ J	80 μ J	-
540 μ H	11.8V	190 μ J	80 μ J	-10 μ J
650 μ H	12.13V	180 μ J	80 μ J	-20 μ J

Table 2. Result of V_{ge} measurement according to drive transformer capacity



2.5 구동변압기 용량에 IGBT 전도 손실

Fig. 12와 같이 제조사에서 제공한 V_{ge} 와 V_{ce} 의 관계에 따르면, V_{ce} 는 구동변압기 430 μ H에서 1.84V, 540 μ H에서 1.83V, 650 μ H에서 1.82V로 0.01V의 차이를 나타낸다.

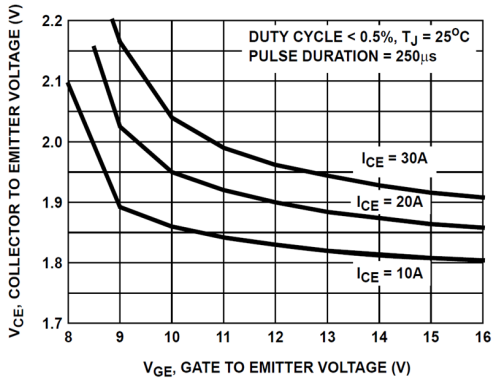


Fig. 12. Collector to Emitter On-state Voltage vs Gate to emitter voltage

Table 4는 측정된 V_{ce} 를 반영한 전도 손실로 430 μ H 일때 21.84J, 540 μ H에서 21.96J, 650 μ H에서 22.08J로 구동변압기 용량이 작을수록 전력손실이 감소하는 것을 확인하였다.

구동변압기 용량에 따른 V_{ce} 의 차이는 0.01V이지만 IGBT의 I_c 전류가 12A의 고전류이므로 0.01V의 차이에서도 전력손실이 큰 특징을 가진다.

Table 4. IGBT Conductive Loss

Drive Transformer	V_{ge}	V_{ce}	I_c	Conductive Loss	Difference Power Loss (Compare to 430 μ H)
430 μ H	11.37V	1.84V	12A	21.84J	-
540 μ H	11.8V	1.83V	12A	21.96J	-0.12J
650 μ H	12.13V	1.82V	12A	22.08J	-0.24J

2.6 IGBT 열화 재현시험

2.4, 2.5에서 구동변압기 용량 감소에 따라 전력손실이 증가하는 것을 확인하였다. 구동변압기 용량 감소에 따른 IGBT 열화 및 BATT FAIL 시험 여부 확인을 위해 구동변압기 용량의 상한(650 μ H), 하한(430 μ H), 정격(540 μ H) 3가지 시료로 재현시험을 수행하였다.

재현시험을 통해 BCCU BATT FAIL 경고 시험 여부, 정상동작 확인을 진행하였으며, 추가적으로 BCCU 내부 온도 측정을 통해 구동변압기 용량 감소에 따른 온도 변화를 확인하였다.

Table 5. IGBT Temperature Rise with Transformer Capacity

Drive Transformer	BATT Fail	Battery Charge Time	Temp Rise	Temp Rise/min
430 μ H	○	25min	40℃	1.53℃/min
540 μ H	○	42min	61℃	1.45℃/min
650 μ H	X	90min (Full Charge)	48℃	0.53℃/min

Table 5와 같은 재현시험 결과 430 μ H의 변압기를 적용한 경우 약 25분 후 BATT FAIL 및 배터리 충전이 중지되었으며, 540 μ H의 변압기를 적용한 경우 약 42분 충전 진행 중 BATT FAIL이 점등되었다. 이에 반해 650 μ H를 적용한 경우에는, 그림과 같이 1시간 30분(배터리 충전 최대시간)동안 온도 상승은 계속되었으나, BATT FAIL이 점등되거나 IGBT가 손상되지 않고 정상적인 충전상태를 유지하였다.

상기의 시험 결과를 온도 상승폭 측면에서 보면 Fig. 13와 같이 430 μ H(하한치)를 적용한 경우 26분 동안 40℃, Fig. 14와 같이 540 μ H(정격)를 적용한 경우 42분 동안 61℃, Fig. 15와 같이 640 μ H(상한치)를 배터리 완충시(90분) 동안 48℃가 상승하였다. 시간당 온도 상승폭은 하한/정격/상한치 각각 1.53℃/min, 1.45℃/min, 0.53℃/min으로 측정되었으며, 구동변압기 용량이 낮을수록 온도 상승폭이 증가하였다.

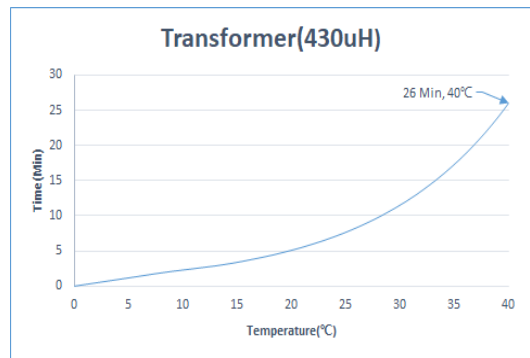


Fig. 13. Temperature Rise Curve (Drive Transformer 430 μ H)

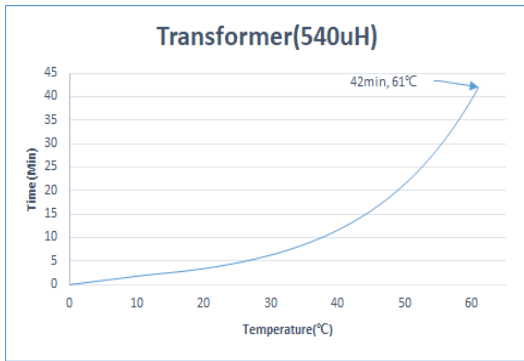


Fig. 14. Temperature Rise Curve(Drive Transformer 540 μ H)

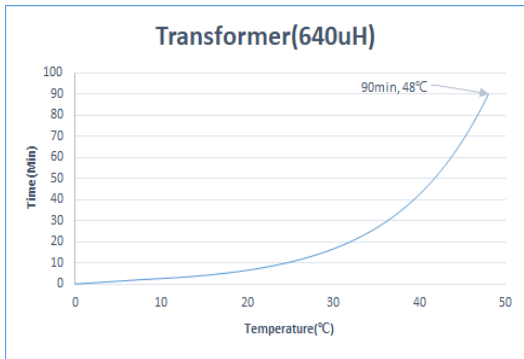


Fig. 15. Temperature Rise Curve(Drive Transformer 640 μ H)

3. 개선안 도출 및 검증

3.1 구동변압기 용량 및 관리 개선

앞서 수행한 원인분석결과 IGBT 열화현상이 발생한 구동변압기는 540 μ H. 공차 20% 제품으로 규격하한치의 제품장착시 IGBT의 입력전압인 V_{ge} 가 감소하며, 이는 IGBT 전력손실 증가, IGBT 발열증가, IGBT 열화로 이어지는 문제 발생을 확인하였다.

이와 같은 문제를 개선하기 위해 구동변압기 용량은 열화문제가 발생하지 않도록 600 μ H 이상의 설정이 요구되며, 개선 구동변압기는 규격하한치의 제품이 입고되더라도 IGBT 열화 문제가 발생하지 않는 정격용량 687.8 μ H, 공차 10%를 가지는 EE1916 변압기로 선정하였다.

개선된 구동변압기 용량(L)은 Eq. 3과 같이 인덕턴스(Inductance) 계수 $AL=1300$, Turn수 $N=23$ 의 자승으로 계산되어, 687.8 μ H가 도출되었으며, 이를 LCR

Meter를 통해 입고시 검사하여, 구동변압기 용량에 따른 열화를 방지하였다.

$$L = AL \cdot N^2 = 1300 \cdot 23^2 / 10^9 = 687.8 \mu H \quad (3)$$

3.2 개선안 검증

2장 원인분석에서 분석된 결과에 따르면 IGBT 열화 현상은 열피로에 의해 발생하며 열피로는 온도변화, 고온에서 IGBT 동작시 가속화된다. 이에 따라, 구동변압기 개선안으로 선정된 EE1916 구동변압기의 개선안 검증을 위해 고온, 저온에서의 온도 시험을 진행하였다.

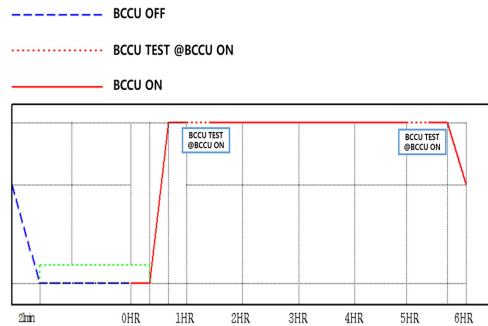


Fig. 16. Temperature Test Curve

시험 조건은 Fig. 16과 같이 항공기 운용 온도인 저온 -00 $^{\circ}$ C, 고온 00 $^{\circ}$ C에서 재현시험을 반복 수행하였다.

10번의 재현시험 및 배터리 충전 가능 수행 중에도 IGBT의 열화현상은 발생하지 않았으며, 배터리 BUS 등 BCCU 출력 부분에서도 이상이 없는 것을 확인하였다.

4. 결론

초음속 항공기에 사용되는 BCCU는 주전원 고장으로 인한 비상전력 공급 필요시 비행제어 시스템 컴퓨터를 포함한 비행필수장비에 비상전력을 공급할 수 있도록 제어하는 역할을 수행한다. 본 논문에서는 BCCU 내부에 IGBT 열화가 발생한 원인을 분석하였으며, 스위칭 손실, 전도 손실에 의해 발열 및 IGBT를 구성하는 재료의 열팽창 계수 차이로 열화가 발생할 수 있다는 것을 식별하였다.

이를 바탕으로 IGBT 주변회로 분석 및 측정을 통해 구동변압기 용량 저하에 의한 전력 손실, IGBT 온도 상

승을 확인하였다. 전력 손실은 구동변압기 용량에 따라 최대 0.24J의 차이가 발생하였고, 온도 상승률은 최대 1.53℃/min에서 최소 0.53℃/min으로 확인되었다.

이와 같은 전력손실 증가, 온도 상승률을 저감 시키기 위해 위해 구동변압기 용량을 재선정하였고 저온, 고온 시험, 항공기 운용등을 통해 이를 검증하였다.

본 연구에서 수행한 결함 분석 및 설계 개선 방안을 통해 BCCU의 IGBT 열화현상을 개선할 수 있었으며, 항공기 안정성 확보 및 가동률 향상에 기여할 수 있었다. 또한 본 연구 결과를 통해 품질개선 노하우를 확보 할 수 있었으며, 유사 결함 발생시 타 무기체계의 개선 활동에 활용 할 수 있을 것으로 판단된다.

References

- [1] Defense Acquisition Program Administration, 643p, Defense Acquisition Program Administration, 2020, Notice on Standard Airworthiness Standards for Military Aircraft, pp. 549
- [2] Kim DW, Jeong SH, An Empirical Study on the Quality Reliability of the Start-up performance of the Fixed Wing Aircraft at low temperature, J Korean Soc Qual Manag, Vol. 46, No. 1, pp.169-188, March 2018
DOI: <http://dx.doi.org/10.7469/JKSQM.2018.46.1.169>
- [3] Y. H. No, S. Y. Lee, G. S. Park, "A study on load circuit for variation of inductance and threshold voltage based on IGBT", *Proc. of 2010 25th ICROS Annual Conference*, Kangwon Univ, Korea, pp. 50-51, March 2015
- [4] Y. H. No, S. Y. Jo, and S. Y. Lee, "A study on reliability of power MOSFET," *Proc. of 2015 ICROS, Daejeon-Chungcheong*, Korea, pp. 64-67, Dec 2015
- [5] R. J. Baker, "High voltage pulse generation using current mode second breakdown in a bipolar junction transistor," *Review of Scientific Instruments*, vol. 62, no. 4, pp. 1031-1036, 1991.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.1142054>
- [6] S. H. Hosseini, A. Zarrin, S. Karimiyeh, "An improved hybrid multilevel converter topology as a utility interface for photovoltaic systems", *16th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, Gyeongju, Korea, pp. 1202-1207, Oct. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICCAS.2016.7832467>
- [7] J. B. Kim, "The study of the 6-switch IGBT module with applying the 600V/15A RC IGBT," M.S. Thesis, Dankook University, 2010.
- [8] M. Ciappa, "Selected failure mechanisms of modern power modules," *Microelectronics Reliability*, vol. 42, pp. 653-667, 2002.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0026-2714\(02\)00042-2](https://doi.org/10.1016/S0026-2714(02)00042-2)
- [9] W. Wu, M. Held, P. Jacob, P. Scacco, and A. Birolini, "Investigation on the long term reliability of power IGBT modules," *Proceedings of the 7th International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs*, Yokohama, Japan, pp. 443-448, May 1995.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISPSD.1995.515079>
- [10] Z. Wang, W. Qiao, B. Tian, and L. Qu., "An effective heat propagation path-based online adaptive thermal model for IGBT modules", *Proceedings of 29th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, Fort Worth, TX, USA, pp.513-518, April 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2014.6803357>
- [11] Cheol-Woo Lee, Chul-Goo Kang, Simplification for Lifetime Prediction of an IGBT Module, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, Vol. 24, No. 7, pp.632-638, 2018
- [12] Naval Air Systems, MIL-STD-704, DEFENSE AGENCY FOR TECHNOLOGY, pp. 38
- [13] Toshiba, IGBTs (Insulated Gate Bipolar Transistor) Application Note, p.20-21, Toshiba, 2018, pp.40
- [14] On Semiconductor, HGTG20N60A4D, p.5-7, On Semiconductor, 2009, pp.11

박 상 훈(Sang-Hoon Park)

[정회원]



- 2015년 8월 : 울산대학교 전기전 자공학부 (공학학사)
- 2015년 7월 ~ 2019년 12월 : 덴 소코리아 연구원
- 2019년 12월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 연구원

<관심분야>

항공전자

김 세 운(Se-Un Kim)

[정회원]



- 2015년 2월 : 충남대학교 항공우 주공학과 (공학사)
- 2017년 2월 : 충남대학교 항공우 주공학과 (공학석사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 국방기술품 질원 연구원

<관심분야>

항공우주공학, 공기역학, 공력소음, 공력수치해석

김 정 민(Jung-Min Kim)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한양대학교 전자공학부(공학사)
- 2017년 9월 ~ 현재 : 국방기술품질원 연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 경상대학교 전자공학부 석사과정

〈관심분야〉
항공전자