

스위칭 주파수에 따른 전기 추진 항공기용 인버터 손실 분석

구분수^{1,†} · 조성현² · 최인호¹

¹한국항공우주연구원 무인기 연구부
²부산대학교

Analysis of Inverter Losses according to Switching Frequency Using Electric Motor for Aircraft

Bon-soo Koo^{1,†}, Seong-hyeon Jo² and In-ho Choi¹

¹Korea Aerospace Research Institute
²Pusan National University

Abstract

Electric propulsion aircraft are being actively researched in the aviation field in recent years to solve environmental and noise problems caused by existing gas turbine engine. In particular, research on a thrust motor as a core component of an electric power propulsion system and an inverter for driving it is actively being conducted. In this paper, a motor with high specific power is selected to determine characteristics of aircraft that are sensitive to weight and volume. Power loss of the inverter is then simulated. In the simulation, the selected motor and power device were modeled using PSIM, a power electronics analysis tool. Inverter power loss according to switching frequency was then analyzed.

초 록

전기추진 항공기는 기존 가스터빈 엔진에 의한 환경 및 소음 문제를 해결하기 위해 최근 항공분야에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 특히 전기 동력추진 시스템의 핵심 구성품인 추력 모터와 이를 구동하기 위한 인버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 본 논문에서는 무게와 부피에 민감한 항공기 특성에 맞는 비출력이 높은 모터를 선정하고, 전력 소자에 따른 인버터 전력 손실을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션은 전력전자 분석 툴인 PSIM을 이용하여 선정된 모터와 전력 소자를 모델링하여 스위칭 주파수에 따른 인버터 전력 손실을 분석 하였다.

Key Words : Electric Propulsion Aircraft(전기추진 항공기), Inverter(인버터), EMRAX208(EMRAX 208 모터), Switching & Conduction loss(스위칭 & 도통 손실), PSIM Program(PSIM 프로그램)

1. 서 론

기존 항공기의 에너지 효율 향상을 위한 대용량 엔진 시스템의 경량화 및 전 세계적인 환경 에너지 비용 증가에 따라 최근 차세대 항공기로서 전기 추진 항공기를 개발 중에 있다. 전기추진 항공기는 현재 개발 중인 다양한 항공기의 차세대 항공기로서 임무장비 탑

재기능의 향상과 조종안정성의 향상 및 임무비행시간 증대 등이 가능한 비행체이다. 전기 동력 기반의 항공기는 분산추진 기술을 이용하여 항공기 추진 시스템의 근본적인 변화를 시도하고 있다. 항공기용 분산추진 방식은 소수의 대형 추진 장치를 다수의 소형 추진 장치로 나누어 기체에 분산 배치하는 방식으로 효율향상과 더불어 항공기의 소음 수준을 낮출 수 있다. 또한 추진시스템의 치명적 고장 위험성을 줄여주고 안전성을 높여주는 특성이 있다 이러한 추세로 미국과 유럽을 비롯한 여러 나라에서는 전기 동력을 이용한 다중 분산 추진 시스템을 개발을 진행하고 있다[1]. 본 논

Received: Mar. 09, 2020 Revised: Nov. 12, 2020 Accepted: Nov. 12, 2020

† Corresponding Author

Tel: +82-042-860-2894, E-mail: bonsoo@kari.re.kr

© The Society for Aerospace System Engineering

문에서는 전력전자 시뮬레이션 툴인 PSIM을 이용하여 전기 추진 시스템에 사용될 모터 및 인버터에 대한 특성을 시뮬레이션을 통해 스위칭 주파수에 따른 인버터 전력 손실을 분석 하였다. PSIM 시뮬레이션에서 사용될 모터는 EMRAX208, 인버터는 Semikron, Infineon 사에 IGBT(Insulated gate bipolar transistor)와 Cree사에 MOSFET(metal-oxide semiconductor field effect transistor) SiC(Silicon Carbide) 인버터 총 3가지를 모델링 하였다.

2. 항공기용 전동기 및 인버터

2.1 항공기용 전동기 선정

항공용 전동기 선정을 위해 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)타입 4개의 후보군을 선정 하였다. 후보군을 선정할 때 최대전력이 90kW와 100kW 사이인 전동기들을 선정하였다. 후보군으로는 최대 전력이 96kW인 HPEVS사의 AC35 Dual, 최대 전력이 90kW인 YASA사의 YASA 400, 최대 전력이 100kW인 Zero motorcycles사의 Zero 75-7과 EMRAX사의 EMRAX228을 선정 하였다. 전기 추진 항공기의 특성상 부피와 무게에 대한 제약이 엄격하다. 따라서 항공기 선정기준으로는 전동기의 출력 밀도를 최우선으로 하였다. 후보군들의 출력 밀도를 계산한 결과, AC35는 1.4kW/kg, EMRAX228는 8.13kW/kg, YASA 400의 경우 3.75kW/kg, Zero 75-7은 3.15kW/kg의 출력 밀도를 갖는다. 따라서 출력 밀도를 기준으로 후보군들을 비교했을 경우 높은 출력 밀도를 갖는 EMRAX228을 항공용 전동기로 선정하였다. 하지만 본 논문에서는 Motor Generator 시험 환경이 구성되어있는 EMRAX228보다 한 단계 아래인 EMRAX208 모터를 이용 하였다. EMRAX208 수냉식 모터 최대 토크는 75 kW, 무게는 9.1 kg 으로 출력 밀도는 7.97 kW/kg 이다.

2.2 EMRAX208 구조 및 전기적 및 기계적 특성

EMRAX 208은 축방향 타입의 영구자석 동기기이고 요크가 없는 구조 이므로 부피와 코어 손실을 줄일 수 있는 구조이다. 20크기로 고정자와 회전자가 설계되어 있으며, 정현파 형태의 역기전력 파형을 갖는다.

EMRAX208 전기적인 특성은 직류단 전압이 470 Vdc, 내부 상저항은 0.014 옴, 내부 인덕턴스는 d축 125 uH, q축 130 uH를 갖으며 약간의 돌극 특성을 가진다. 그리고 토크 상수는 0.8 [Nm/1Aph rms], 역기전력 상수는 68.4 [Vpk/Arms], 축방향 자속은 0.0393[V_s]을 갖는다. 기계적 특성으로는 0.023[kg*m²]의 관성모멘트, 출력 가능한 최대 전력은 75[Kw]이다. 정격전류는 100[Arms], 정격 토크는 80[Nm]이다.



Fig. 1 EMRAX208 Motor

Table 1 EMRAX208 Mechanical Characteristics

Mechanical	
Type	Axial Flux synchronous PMSM, Sinsoidal three phase
Casing diameter	208 mm
Axial length	85 mm
Dry mass	9.1kg(AC)/9.3(CC)/9.4(LC)
Stator cooling	air(IP21)/ water glycol(IP68)/combined(IP21)

Table 2 EMRAX208 Electrical Characteristics

Electrical	
Maximal battery(V)	470(HV)/320(MV)/125 Vdc(LV)
Peak power (at 6000 RPM)	75 kW
Continuous power	up to 40kW
Peak torque	140 NM
Continuous torque	up to 80Nm
Efficiency	up to 98%

2.3 항공기용 인버터 선정

일반적으로 인버터는 직류 전력을 교류 전력으로 변환하는 전력 변화 장치이다. PWM 인버터의 경우 교류전압의 크기와 주파수를 임의로 제어 할 수 있어 광범위한 분야에서 사용되어지고 있다.

인버터는 높은 스위칭 하여 구동시킬 때는 고조파 감소에 의한 파형 개선과 필터 기기의 소형화 및 경량화를 할 수 있지만 이에 반해 스위칭 주파수가 높아질수록 스위칭 손실은 증가한다. 이러한 손실은 주로 소자의 발열과 신뢰성 저하 및 소자의 수명단축 등의 문제점으로 발생한다. 따라서 열 방출 및 손실을 얼마나 감소시키는지와 스위칭 소자의 수명, 가격 및 냉각기의 부피 등을 결정짓는 주요요소로 작용하게 된다[2].

본 논문에서는 인버터는 IGBT 소자를 이용한 SEMIKRON(SKip26GB12T4V1), Infineon(FF600R12ME4) 그리고 SiC 소자를 이용한 Cree(CAS300M12BM23) 인버터를 선정 하였다. 디바이스 소자에 따라 인버터 스위칭 주파수영역이 달라지며, 높은 스위칭 주파수를 사용하면 제어기의 대역폭도 증가하며 제어기 성능이 개선이 되면서, 전류 리플과 토크 리플이 감소하게 된다. 따라서 비출력이 높은 모터를 사용하게 되면, 높은 스위칭 주파수를 갖는 전력반도체 소자가 요구된다. 스위칭 시간은 스위치의 특성에 의해 결정된다. 이때 스위칭 시간은 Eq. 1과같이 정의되며. 턴 온 시간과 턴 오프 시간은 Eq. 2 로 정의된다.

$$t_{sw} = t_{on} + t_{off} \quad (1)$$

$$t_{on} = t_{d(on)} + t_r, t_{off} = t_{d(off)} + t_f \quad (2)$$

2.4 SEMIKRON SKip 26GB12T4V1

SKip26GB12T4V1 전기적특성은 $V_{ce} = 1200 V, I_c = 290 A$ 최댓값을 가지며, 온도 범위는 $T_j = -40 \sim 175 ^\circ C$, 스위칭 Turn on/off 에너지는 접합 온도가 $150 ^\circ C$ 일 경우 $E_{on} = 13.6 mJ, E_{off} = 22.1 mJ$ 이다. 또 다른 특징으로는 Trench 4 IGBTs, CAL(Controlled axial lifetime) 기술의 강력하고 자유회전 다이오드, 신뢰성이 높은 접점, NTC-T(Negative Temperature Coefficeient Temperature) Sensor의 특징을 가지고 있다.

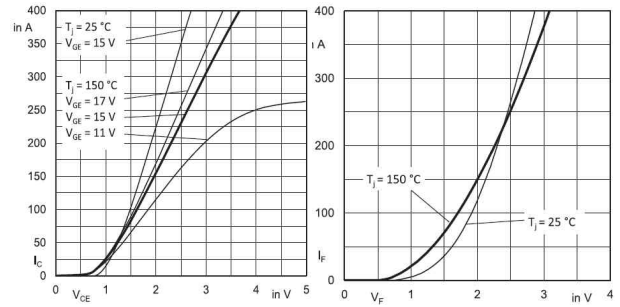


Fig. 2 Output characteristic, inclusive RCC'+ EE' CAL diode forward charact., incl. RCC'+ EE

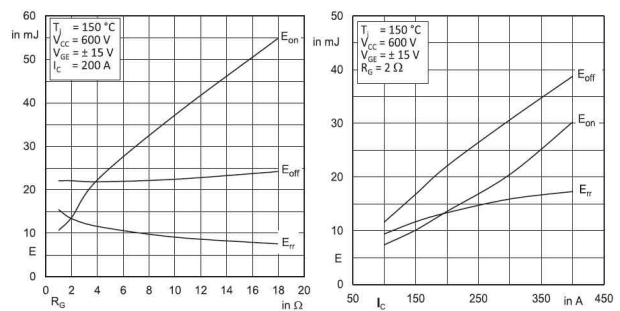


Fig. 3 Turn-on /-off energy = f (RG)
Turn-on /-off energy = f (IC)

2.5 Infineon FF600R12ME4

FF600R12ME4 전기적특성은 $V_{ce} = 1200 V, I_c = 995 A$ 최댓값을 가지며, 온도범위는 $T_j = -40 \sim 150 ^\circ C$, 접한 온도가 $150 ^\circ C$ 에 스위칭 Turn on/off 에너지는 $E_{on} = 90 mJ, E_{off} = 79.5 mJ$ 이다. 그리고 기계적 특성으로는 높은 전력 밀도와, 독립된 Base plate, 표준 하우징을 가지고 있다.

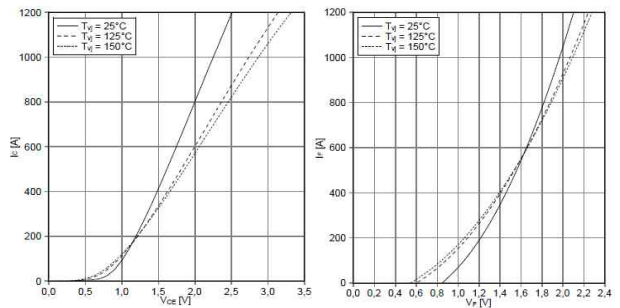


Fig. 4 Output characteristic IGBT, Inverter (typical)
Forward characteristic of Diode, Inverter (typical)

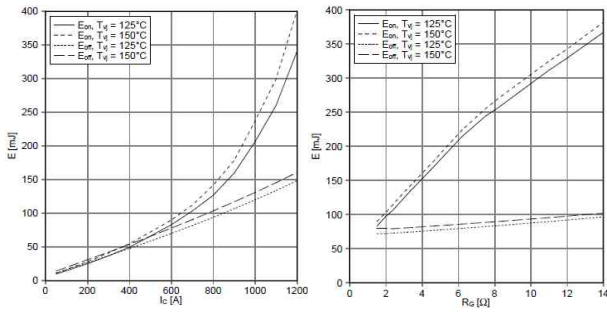


Fig. 5 switching losses IGBT, Inverter (typical)
switching losses IGBT, Inverter (typical)

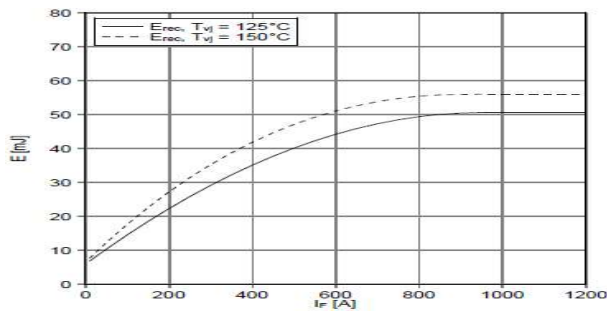


Fig. 6 Switching losses Diode, Inverter (typical)

2.6 Cree CAS300M12BM2

CAS300M12BM2 전기적 특성은 $V_{ds} = 1200 V$, $I_D = 423 A$ 최댓값을 가지며, 최대 온도는 $T_j = 150^\circ C$, 접한 온도가 $150^\circ C$ 에 스위칭 Turn on/off 에너지는 $E_{on} = 5.8 mJ$, $E_{off} = 6.1 mJ$ 이다. SiC 소자의 특징으로는 매우 작은 전력 로스와, 높은 스위칭 주파수 동작, 다이오드에서 Zero Reverse Recovery Current, MOSFET zero Turn-off Tail Current, 정상꺼짐에 대한 안전장치, 페러일링의 용이성, 구리 베이스 플레이트 및 알루미늄 니트라이드 절연체를 가지고 있다.

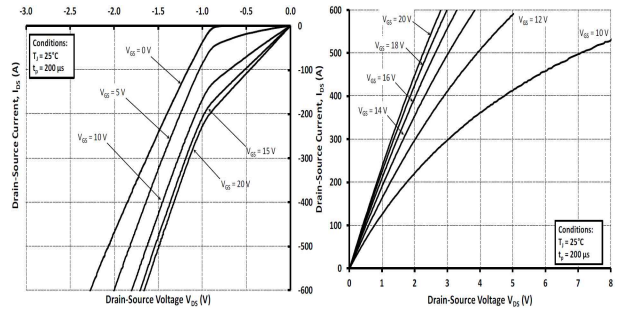


Fig. 7 Output Characteristics $T_J = 25^\circ C$
3rd Quadrant Characteristic at $25^\circ C$

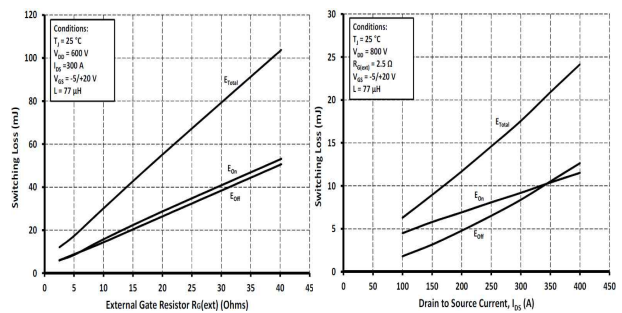


Fig. 8 Inductive Switching Energy vs. R
Inductive Switching Energy vs. Drain Current
For $V_{DS} = 800 V$, $R_G = 2.5 \Omega$

3. 손실전력 계산

시뮬레이션은 전력전자해석 프로그램 PSIM을 이용하여 EMRAX208 모터와 Semikron (Skiip26GB12T4V1), Infineon (FF600R12ME4), Cree (CAS300M12BM2) 3사에 인버터를 모델링 하였다. PSIM은 모든 전력회로 설계를 위한 시뮬레이션 프로그램이다. SPICE 계열의 시뮬레이션 프로그램에 비해 빠른 시뮬레이션 기능과 파형 처리 기능 용이하다. 또한 사용자 인터페이스와 파워 컨버터 해석과 컨트롤 루프 설계 등을 위한 강력한 시뮬레이션 환경을 제공하고 있다. 본 논문에서 시뮬레이션은 EMRAX208정격 토크인 65 NM에 로드를 인가하고 RPM은 2000으로 고정 하였다. 기본 조건은 동일하게 하고 스위칭 주파수를 증가시켜, 스위칭 주파수에 따른 상전류 THD, 인버터 전력 손실을 확인하였다. 전력손실은 도통손실과 스위칭 손실로 나누어진다[3]. 인버터의 전력 손실은 인버터 전류에 비례한다. 따라서 시스템에 따라 특성이 다르지만 큰 전

류가 흐르는 경우 손실의 크기는 무시 할 수 없다. 방열판의 크기를 크게 설계해야하기 때문에 시스템의 부피 및 무게를 증가 시킨다. 또한 내부의 전력손실은 소자의 발열을 일으키고 소자 파괴를 야기 할 수 있기 때문에 활용도에 맞는 인버터와 모터를 고려하여 선정해야 한다. 본 논문에서 시뮬레이션 조건은 470 Vdc, EMRAX208 Motor, Load 65 NM, 추종 RPM 2000, 스위칭 주파수는 10 kHz~50 kHz까지 10KHz 단위로 시험을 진행 하였다.

인버터의 스위칭 소자의 손실은 도통 손실과 스위칭 손실의 합으로 계산된다. 도통 손실은 스위치가 도통 되었을 경우 스위치의 on 저항에 걸리는 손실이며, 스위칭 손실은 스위치가 켜지고 꺼지는 순간 생기는 손실분이다. IGBT의 도통 손실은 Eq. 3 계산식이고, Eq. 4,5 식은 스위칭 on/off 에 대한 손실 계산식이다 [4]. Eq. 6 식은 MOSFET SiC의 도통 손실 계산식이고, Eq. 7,8식은 스위칭 on/off에 대한 손실 계산식이다.

P_{cond} 는 도통 손실 전력, $P_{sw Qon/off}$ 는 스위칭 전력 손실 계산식이다.

$$P_{cond} = V_{ce} * I_c \quad (3)$$

$$P_{sw Qon} = E_{on} * f * V_{cc} / V_{ccdatasheet} \quad (4)$$

$$P_{sw Qoff} = E_{off} * f * V_{cc} / V_{ccdatasheet} \quad (5)$$

$$P_{cond} = I_D^2 * R_{DS(on)} \quad (6)$$

$$P_{sw Qon} = E_{on} * f \quad (7)$$

$$P_{sw Qoff} = E_{off} * f \quad (8)$$

Table 3 Test Condition

Test Condition	
Vdc	470[V]
Switching Freq	10~50K[hz]
Reference RPM	1000~5000
Load	68[NM]
Dead Time	1u[s]
EMRAX208 Parameter	
stator winding resistance	0.014 [Ω]
d-axis inductance	125u[H]
q-axis inductance	135u[H]
back EMF constan	68.4[Vpk/krpm]
poles	20
moment of inertia	0.0256[kg·m ²]
shaft time constant	100[sec]

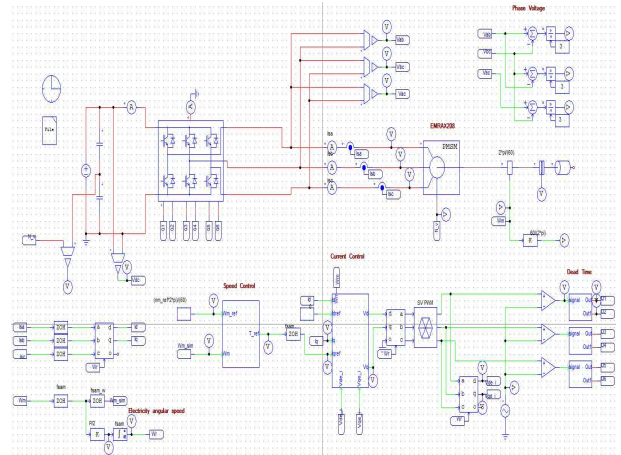


Fig. 9 EMRAX208 Simulation in PSIM

4. 손실전력 결과 분석

시뮬레이션 결과는 PSIM에서 제공하는 SIMVIEW를 이용하여 확인 하였다. 시험 파라미터는 상전류 THD, 트랜지스터 도통 손실전력(P_{cond}), 트랜지스터 스위칭 손실전력(P_{sw}), 다이오드 및 트랜지스터 총 손실전력(P_{Total})을 분석 하였다. 그래프에서 빨강, 파랑, 초록, 보라, 주황 색순으로 10 kHz, 20 kHz, 30kHz, 40 kHz, 50 kHz의 실험 결과이다. 일반적으로 스위칭 주파수가 낮을수록 도통 손실 전력은 증가하고 스위칭 손실은 작다. 현재 사용하고 있는 EMRAX208모터는 출력밀도는 높지만, 모터 내부 인덕턴스가 d축 125 uH, q축 130 uH로 작아 낮은 스위칭 주파수에서 전류 리플이 크게 발생하여 항공기에서 사용하기에는 부적합하다. 비출력이 높은 모터일수록 스위칭 주파수가 낮을 경우 전류 리플 크기에 의해 전류제어가 힘들어진다. 인버터 시험 결과를 보면 상전류에 리플이 큰 파형이 스위칭 주파수가 10 kHz일 때이며, 그때 상전류의 THD도 가장 높다. 또한 스위칭 주파수가 증가하면서 기본파 전류의 크기도 감소하기 때문에 스위칭 주파수가 커지게 되면서, 도통 손실도 감소하게 된다. 스위칭 주파수를 20 KHz 이상부터는 전류 리플이 작아지면서 상전류 rms 값과 THD값이 50%정도 감소하게 된다. 또한 전류 리플이 적어지면서 도통 손실도 낮아지게 된다. 하지만 스위칭 손실은 스위칭 주파수가 증가 할수록 증가한다. 또한 고속 주파수로 갈수록 SiC MOSFET이 IGBT 인버터 보다 전력손실이 적은

것을 확인 하였다.

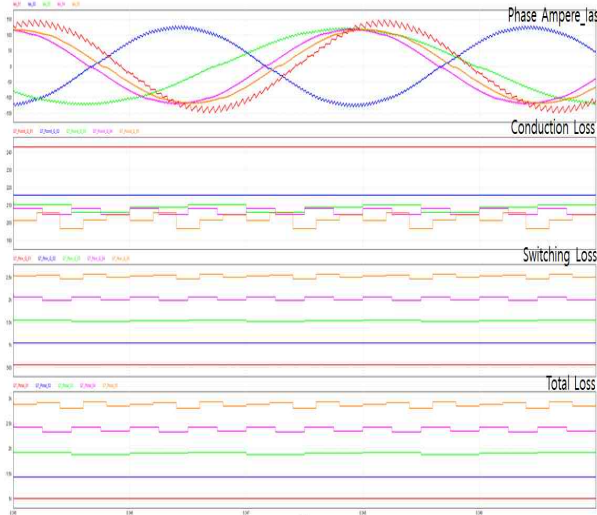


Fig. 10 IGBT Semikron Test Result

Table 4 IGBT Semiron Test Result

SiC MOSFET (Cree)	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	50 kHz
IAS THD [%]	4.57	3.17	2.75	2.32	2.48
Conduction Loaa [W]	243.1 6	215.8 9	207.1 7	204.4 5	202.7 0
Switching Loss [W]	560.4 5	1051. 98	1542. 41	2036. 12	2530. 24
Total Loss [W]	1003. 47	1432	1910	2396. 71	2887

Table 5 IGBT Infineon Test Result

SiC MOSFET (Cree)	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	50 kHz
IAS THD [%]	4.59	3.04	2.59	2.54	2.37
Conduction Loaa [W]	171.4 8	153.4 5	148.3 2	145.9 2	144.7 5
Switching Loss [W]	127.7 9	260.5 4	394.2	528.2 0	659.5 2
Total Loss [W]	420.5 6	531.6 3	667.0 6	809.5 7	949.4 3

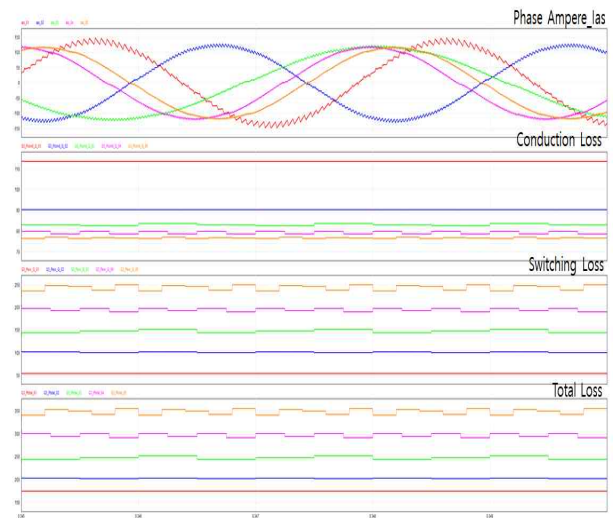


Fig. 12 MOSFET SiC Test Result

Table 6 MOSFET SiC Test Result

SiC MOSFET (Cree)	10 kHz	20 kHz	30 kHz	40 kHz	50 kHz
IAS THD [%]	4.58	3.11	2.58	2.37	2.28
Conduction Loaa [W]	113.7 4	90.44	83.23	79.45	76.86
Switching Loss [W]	54.81	100.6 8	148.2 2	196.0 5	243.6 6
Total Loss [W]	420.6	2027. 76	248.1 9	297.4 6	347.6 6

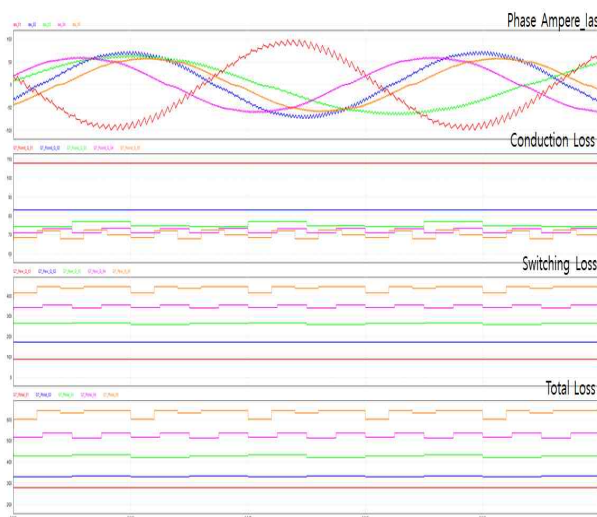


Fig. 11 IGBT infineon Test Result

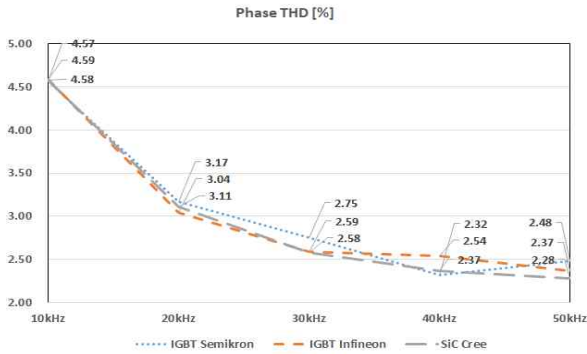


Fig. 13 IAS THD

Table 7 IAS THD

	Phase rms(A)				
	10 Khz	20 Khz	30 Khz	40 Khz	50 Khz
IGBT Semikron	4.57	3.17	2.75	2.32	2.48
IGBT Infineon	4.59	3.04	2.59	2.54	2.37
SiC MOSFET Cree	4.58	3.11	2.58	2.37	2.28

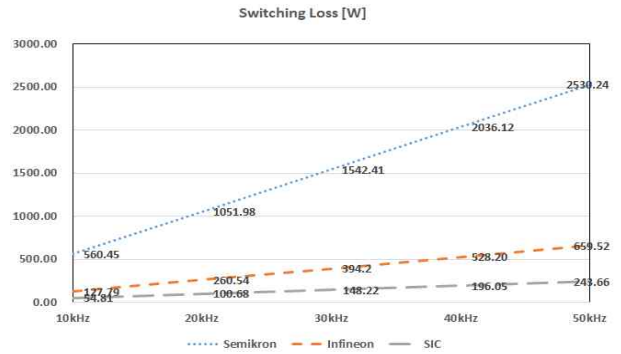


Fig. 15 Switching Loss

Table 9 Switching Loss

	P_Switching Loss(W)				
	10 Khz	20 Khz	30 Khz	40 Khz	50 Khz
IGBT Semikron	560.45	1051.98	1542.41	2036.12	2530.24
IGBT Infineon	127.79	260.54	394.2	528.20	658.52
SiC MOSFET Cree	54.81	100.68	148.22	196.05	243.66

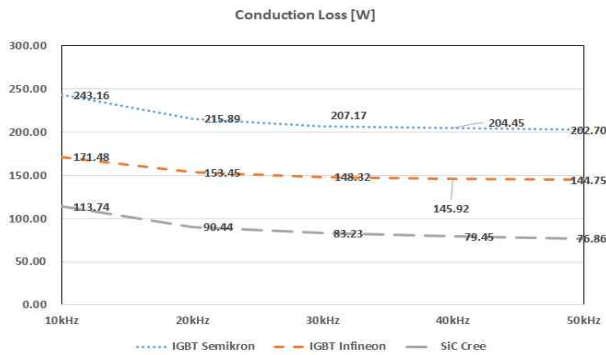


Fig. 14 Conduction Loss

Table 8 Conduction Loss

	P_conduction Loss(W)				
	10 Khz	20 Khz	30 Khz	40 Khz	50 Khz
IGBT Semikron	243.16	215.89	207.17	204.45	202.70
IGBT Infineon	171.48	153.45	148.32	145.92	144.75
SiC MOSFET Cree	113.74	90.44	83.23	79.45	76.86

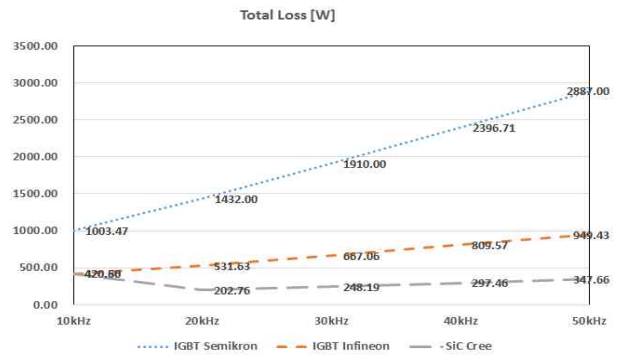


Fig. 16 Inverter Total Loss

Table 10 Total Power Loss

	P_Total(W)				
	10 Khz	20 Khz	30 Khz	40 Khz	50 Khz
IGBT Semikron	1003.47	1432.00	1910.00	2396.71	2887.00
IGBT Infineon	420.88	531.63	667.06	809.57	949.43
SiC MOSFET Cree	420.60	202.76	248.19	297.46	347.66

5. 결 론

매우 큰 출력 밀도를 갖는 EMRAX208 구조상 내부 인덕턴스는 d축 125 uH, q축 130 uH로 작게 설계되었다. 내부 인덕턴스 값이 작기 때문에 10 KHz의 저속 스위칭 주파수로 운전시 전류 리플이 크게 나타나는 것으로 분석 된다. 따라서 항공기에 사용되는 전동기 모터는 출력밀도가 중요하지만 이러한 출력밀도가 높은 모터를 사용하기 위해서는 고속 스위칭이 가능한 인버터를 사용해야 전류 및 토크 리플이 감소되면서 진동 및 소음이 감소하고 효율적인 비행이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국가과학기술연구회(한국항공우주연구원 주요사업)에서 지원한 “다중 전기추진 핵심 시스템 기술연구” 사업의 연구결과의 일부이며 지원에 감사드립니다.

References

- [1] B.S Koo, D.K. Han and I.H. Choi, “Trend Analysis of power electronics system and motor for electric propulsion aircraft“ *Current Industrial and Technological Trends in Aerospace*, vol. 17,no 2, pp 45-54, Dec 2019.
- [2] S. Shin, T. H.Kim and W. C.Lee “High Frequency Switching Inverter Using SiC MOSFET”, *The korean institute of Power Electronics*, 161-162, July. 2016.
- [3] J.Y. Yoo, “Improvement on Estimation of power semiconductor Device using PSIM simulation“ Department of Electrical Engineering Graduate School, Korea University, Feb. 2002.
- [4] PSIM Users Manual