

Thermal and structural design optimization of the rotor support in high-speed superconducting motors

Kihwan Kim^a, Yubin Kim^a, Changhyung Lee^b, and Seokho Kim^{b,*}

^a Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University, Republic of Korea

^b Mechanical Engineering, Changwon National University, Republic of Korea

(Received 9 December 2024; revised or reviewed 20 December 2024; accepted 21 December 2024)

Abstract

Electric motors, as the core of modern electric propulsion platforms, face increasing demands for high power density and lightweight designs. Conventional electric motors, relying on copper windings and iron cores, encounter significant limitations in meeting these requirements, particularly in applications such as aircraft and heavy-duty vehicles. High-temperature superconducting (HTS) tapes, characterized by their superior current-carrying capacity under critical conditions, offer a promising alternative. Motors incorporating HTS tapes demonstrate exceptional power-to-weight ratios, driving extensive research into replacing conventional motors. However, for mobility applications, HTS motors require optimized support structures designed to meet weight constraints. Unlike static applications of HTS coils, the support structure for a rotating superconducting rotor must ensure torque transmission and maintain cryogenic conditions while addressing both structural and thermal factors. This study focuses on the optimized design of the support structure for a superconducting rotor equipped with HTS coils. The proposed design is evaluated through finite element method (FEM) analysis, verifying its mechanical and thermal performance under operational conditions.

Keywords: critical angular speed, cryogenic, heat loss, HTS motor, mechanical support, vibration

NOMENCLATURE

Symbol	Definition	Unit
A	Cross-sectional area of the support	m^2
d_i	Inner diameter of support	m
d_o	Outer diameter of support	m
δ	Deflection of support	m
T	Temperature	K
E	Elastic modulus	Pa
f_n	Natural frequency	Hz
g	Gravitational acceleration	m/s^2
Γ	Torque	N·m
I	Moment of inertia	m^4
I_p	Polar moment of inertia	m^4
K	Stiffness	Pa
k	Thermal conductivity	W/m·K
L	Length of the support	m
m	Mass of the rotor	kg
N_c	Critical angular speed	RPM
ω_c	Critical angular frequency	Hz
\dot{Q}	Heat transfer rate	W
σ_{eq}	Equivalent stress	Pa
τ	Shear stress	Pa
W	HTS rotor weight	kg
Z_p	Polar section modulus	m^3

1. 서 론

현대 운송 기술에서 전기모터는 고효율 밀도와 경량화라는 두 가지 요구를 동시에 충족해야 한다. 기존 전기모터는 구리 권선과 철심을 사용하여 자속과 자장을 생성하는 구조를 채택하지만, 이러한 설계는 중량 증가와 효율 저하를 초래한다. 특히 항공기와 대형 상용차와 같이 높은 출력과 경량화가 필수적인 응용 분야에서는 기존 모터 적용 방식이 명확한 한계를 드러낸다 [1-3]. 고온초전도(HTS) 선재는 무저항 특성과 높은 임계전류 밀도를 통해 기존 상전도 모터를 대체할 수 있는 가능성이 있다. 때문에 HTS 모터는 기존 모터 대비 향상된 출력 대비 중량비를 가질 수 있으며, 이러한 특성 덕분에 항공기, 상용차 등 다양한 모빌리티 응용에서 주목받고 있다 [4]. 최근 연구는 HTS 모터의 코일 형상 설계, 배치 프로토타입의 제작을 중심으로 진행되고 있으나 [5-7], 시제품 단계에서 구조 설계와 지지부 최적화에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한, 최근에는 액체수소(LH₂) 등 극저온 냉매를 적용하거나 또는 극저온 냉동기를 부착하는 냉각 시스템 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 시스템은 극저온 환경 조성을 위해 열 부하를 줄이고 회전구동에 대한 기계적 안정성을 유지해야 한다. 따라서 HTS 모터의 성능을 유지하기 위해 지지부 설계가 더욱 중요해졌다 [8]. 본 연구에서는 HTS 회전자의 동축으로 양단에 위치하는 동력 전달을 위한 토크 튜브 형상의 지지부로 설계한다. 동력 전달 지지부는 회전력(토크)을 외부로 전달하기 위해 토크에 의한 비틀림 응력을 견딜 수 있도록 설계하여야 한다. 또한 냉각 시스템의 효율성을 위해 전도 열 부하를 최소화 하고 구조적 안정성을

* Corresponding author: seokho@changwon.ac.kr

확보하기 위해 고유진동수로 인한 위험 속도를 회피 할 수 있도록 해야한다. 본 연구는 500 kW급 초전도 모터 회전자의 운용조건에 따라 지지부의 소재를 선정하고 기계적, 열적 설계요소를 고려한 형상 설계를 수행하였다. 설계과정에서 열적 요소로서 외부 상온과 극저온의 전도 열전달, 기계적 요소로서 토크 대응과 위험 속도의 관계에서 공통적인 형상 인자를 도출하고 최적화된 설계안을 제안한다.

2. 액체수소 냉각 고온초전도 모터 개요

2.1. 고온 초전도 회전자의 형상 및 운용조건

HTS 회전자는 500 kW급 부분 HTS 모터의 핵심 구성 요소로 설계되었다. Table 1은 본 연구에서 설정한 HTS 회전자의 주요 운용 조건을 나타내며, Fig. 1과 Fig. 2는 HTS 모터의 개략도와 회전자 코일의 3D 모델링을 각각 보여준다. Fig. 1에서 냉각시스템은 냉각유체로는 액체 수소(LH₂)등의 극저온 냉매를 동심관에 공급 하고 비등냉각을 통해 HTS 코일의 온도를 운전온도 이하로 냉각을 유지한다. 여기서 냉매의 입출구부분에 소형 냉동기를 부착하는 것으로 대체도 가능하다. 여기서 설정된 코일의 운전온도는 30 K 이며 주변 외기온도는 293 K이다. 결국 외부 진공 단열용기와 내부 HTS코일 및 열교환기 간의 큰 온도 차이로 인한 열 부하가 발생한다 [9-11]. 회전자는 3000 RPM의 정격 속도에서 500 kW의 정격 출력을 가지며 이를 통해 토크는 1591.5 N·m가 산출된다. 회전자의 HTS 코일의 축방향 길이는 300 mm로 가정하고, 코일의 냉각을 위해 회전자 중심에 열교환 레저보어(Reservoir)에 부착된다. HTS 코일의 극저온 냉각을 위해 진공 용기 속에 HTS 회전자가 위치해야 하며, 회전자의 토크를 전달하기 위해서 진공 용기 플랜지와 회전자를 연결하기 위한 토크 튜브형 지지부를 설계해야 한다. 지지부의 설계는 기계적으로 안정적인 토크의 전달과 동시에 외부 열침입을 최소화하여야 하며, 또한 고속 회전시 회전 안정성을 확보할 수 있도록 설계되어야 한다. 본 연구에서는 HTS모터의 최대 크기를 고려하여 지지부의 최대 길이는 200 mm 이하로 제한하였으며 토크지지부의 내경은 냉매 이송관등의 크기를 고려하여 70 mm으로 고정하고 외경과 길이를 변경하면서 설계를 진행하였다. 이는 지지부 내부에 냉매 이송용 배관 삽입 혹은 소형 냉동기의 콜드헤드 연결, 진공 배기를 위한 배관

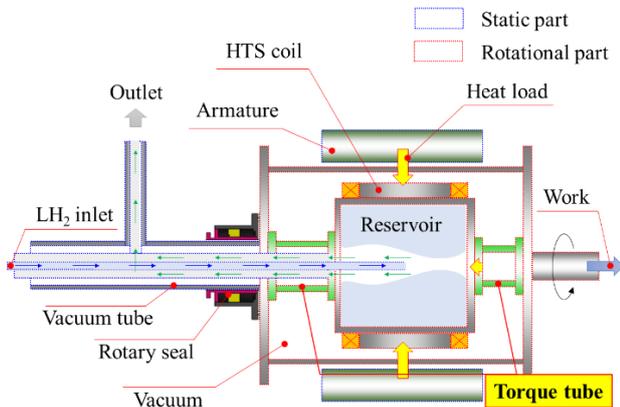


Fig. 1. 500 kW HTS electric propulsion platform P&ID.

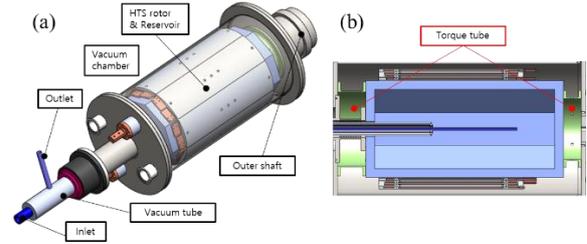


Fig. 2. Components of the HTS rotor: (a) 3D modeling, (b) cross-sectional view.

TABLE I
GEOMETRY AND OPERATING CONDITIONS OF THE HTS ROTOR

Parameter	Value
HTS coil temperature	< 30 K
Ambient temperature	293 K
Rated operating speed	3000 RPM
Rated power	500 kW
Torque	1591.5 N·m
Load shaft	both sides
HTS coil length	300 mm
Total HTS coil & reservoir mass	30 kg
Total torque tube length	< 200 mm
Support inner diameter	70 mm (both sides)

TABLE II
PROPERTY OF SS304 AND GFRP G-10

Parameter	Value			
	293 K	161 K	30 K	
SS304	k (W/m·K)	15.1	11.5	3.5
	Yield strength (MPa)	233	234	344
	E (GPa)	198.2	208.1	210.1
GFRP G 10	k (W/m·K)	0.85	0.59	0.23
	Tensile strength (MPa)	240	-	-
	E (GPa)	28.0	35.1	39.3

연결 공간 등을 고려하였다 [12]. 이때 회전자의 구동으로 발생하는 토크 부하는 양측 지지부에 걸리는 구조로 설정하였다. 이러한 대칭 설계는 회전자의 균형 유지와 진동 최소화, 그리고 극저온 환경에서의 안정적인 지지부 설계가 가능하다.

2.2. 지지부 소재 선정

본 연구에서는 양측 지지부를 모두 동력 전달에 관여하도록 설계하였으며, 지지부 소재로는 SS304와 GFRP G 10을 각각 사용한 두 가지 설계안을 고려하였다. Table 2는 두 소재의 상온과 극저온으로 냉각되었을 때 물성치를 보여준다 [13-15]. SS304와 GFRP G 10 소재는 상대적으로 열전도율이 낮고 기계적 강도가 높아 극저온 환경에서의 지지부 설계에 널리 사용된다. 회전자의 운전시 지지부는 HTS 코일의 온도 30 K과 293 K의 고정된 외부온도간 설치된다. 따라서 지지부의 적용구간 내에서 대부분의 온도구배가 형성되므로 물성치는 온도의 평균값인 161 K에서의 물성치를 적용하였다.

3. HTS 회전자 지지부 설계 이론

HTS 회전자 지지부 설계는 열적, 구조적, 동적 요구 사항을 동시에 만족해야 한다. 지지부는 전도 열 부하를 최소화하고, 정격 토크를 안정적으로 전달하며, 고유 진동수 설계를 통해 공진 위험을 회피하도록 설계된다. 이를 위해 전도 열 부하, 전단 응력 및 굽힘 응력, 그리고 고유 진동수 간의 상호 관계를 분석한다.

3.1. 지지부의 전도 열 부하

지지부는 외부 상온에 노출된 진공 용기와 극저온의 HTS 코일 열교환기 간 지지하는 구조에서 전도 열침입이 발생한다. 극저온 기기 설계시 전도 열 부하는 일반적으로 푸리에 전도 열전달 법칙(Fourier's Law of Heat conduction)을 적용하여 산출한다. 푸리에 전도 열전달 법칙으로 축 1개의 전도 열 부하는 다음과 같다:

$$\dot{Q} = (k \cdot A \cdot \Delta T) / L \quad (1)$$

여기서 $A = \pi (d_o^2 - d_i^2)$ 는 지지부 단면적, k 는 재료의 열전도도, L 은 지지부 길이이다. 이를 대입하면 다음과 같이 정리된다:

$$\dot{Q} = (\pi \cdot k \cdot (d_o^2 - d_i^2) \cdot \Delta T) / 4L \quad (2)$$

외직경 d_o 가 증가하면 단면적이 커져 열 부하가 증가하고, 길이 L 이 증가하면 열전달 경로가 길어져 열 부하가 감소한다. 내직경 d_i 는 고정값(70 mm)으로 설정되었으므로, 설계 변수는 외직경 d_o 와 지지부 길이 L 이다. 열 부하를 최소화하려면 d_o 를 작게 유지하거나 L 을 늘리는 것이 효과적이다. 그러나 d_o 와 L 의 변화는 구조적 안정성과 동적 성능에 상충되는 영향을 미치므로, 최적 설계가 필요하다. 따라서 토크에 대한 응력, 위험 속도 설계 결과에 따른 d_o 와 L 에 따라 열 부하량이 결정된다.

3.2. 발생 토크에 대한 응력 및 축 설계

HTS 회전자 지지부는 1591.5 N·m 의 정격 토크를 전달해야 하며, 이를 위해 전단 응력과 굽힘 응력을 모두 고려해야 한다. 전단 응력은 중공축의 d_i , d_o , 단면 2차 모멘트 I_p , 극단면계수 Z_p 의해 다음과 같이 계산된다:

$$\tau = T / Z_p \quad (3)$$

$$I_p = \pi d_o^4 (1 - (d_i/d_o)^4) / 32 \quad (4)$$

$$Z_p = I_p / 0.5d_o = \pi d_o^3 (1 - (d_i/d_o)^4) / 16 \quad (5)$$

$$\tau = 16T / \pi d_o^3 (1 - (d_i/d_o)^4) \quad (6)$$

식 (6)에서 외직경 d_o 가 증가하면 단면 2차 극모멘트 J 가 급격히 증가하여 최대 전단 응력이 감소한다. 따라서 d_o 가 고정된 조건에서는 d_o 에 의해 변화하는 최대 전단응력이 소재의 항복강도에 최소 d_o 이 결정된다. 본 연구에서는 순수 비틀림 조건을 가정하여 굽힘 응력을 주요 설계 기준에서 제외하였다. 이는 HTS 회전자 지지부에서 굽힘응력이 자중 및 관성 하중으로 제한되어 굽힘 응력이 비틀림으로 인한 최대 전단응력에 비해 무시 할 수 있다고 판단하였다. 즉, 축에 작용하는 등가응력은

모어의 응력원 계산에 의해 최대 전단응력에서 $\sqrt{3}$ 을 곱한 값으로 환산 가능하다. 이는 축 설계 및 분석을 단순화한다. 또한 축의 반경 산출시 안전계수를 반영하여야 한다. 따라서 Joseph Vidosic이 제안한 값에 따라 허용응력에 대한 안전계수 2 를 적용하였다[16]. 산출된 값은 본 연구에서 적용하는 SS304, GFRP G 10 소재의 항복강도와 비교하여 최소 d_o 를 결정하였다.

3.3. 위험 속도 회피 설계

HTS 회전자와 같은 회전체는 베어링과 같은 축의 지지점에서 회전자의 질량에 의한 처짐이 발생한다. 이를 회전점으로 인한 진동이 발생하여 각진동수로 표현이 가능하다. 이때 회전속도가 높아지면서 회전에 의한 각진동수가 축의 고유진동수 f_n 이 같아지는 지점이 생기며 이를 위험 속도 N_c 혹은 위험 각진동수 ω_c 이다. 위험 속도에 근접하면 공진현상으로 인한 축의 파손이 발생할 위험이 있어 설계시에 정격 운전속도에 도달할 때 까지 근접하지 않도록 하여야 한다. 축의 고유진동수 f_n 는 축의 강성 K 와 회전자의 질량 m 에 의해 정의되며, 다음과 같이 계산된다:

$$f_n = \omega_c = \sqrt{K/m} = \sqrt{(\delta / g)} \quad (8)$$

축 처짐량 δ 을 산출하기 위해서 중공축이 지지하는 HTS 회전자 코일과 열교환기를 단일 질점으로 한 무게의 영향만 고려하고 축의 무게는 무시하여 위험 속도 산출 및 분석을 단순화한다. 또한 HTS 회전자를 중심으로 양측 축의 길이 L 도 동일한 길이로 적용하고 모터의 특성상 지지점의 베어링은 처짐이 없이 스러스트(Thrust)베어링으로 지지한다고 가정한다. 이러한 조건에 따라 축 처짐량 δ , 축의 단면 모멘트 I 에 의한 고유진동수 f_n 은 다음과 같이 산출 된다:

$$\delta = W \cdot L_1^3 \cdot L_2^3 / 3E \cdot I \cdot (L_1 + L_2)^3 = W \cdot L^6 / 3E \cdot I \cdot 8L^3 \quad (9)$$

$$I = \pi (d_o^4 - d_i^4) / 64 \quad (10)$$

$$f_n = \sqrt{(3E \cdot I \cdot 8L^3) / (m \cdot L^6)} \quad (11)$$

$$N_c = (30/\pi) \cdot \sqrt{(3E \cdot I \cdot 8L^3) / (m \cdot L^6)} \quad (12)$$

식 (10)에서 의해 d_o 가 고정된 조건에서 d_o 가 증가하면 축의 강성이 높아져 고유진동수가 증가하고 식(11)에 의해 축의 길이 L 이 증가하면 고유진동수가 감소하게 된다. 결국 위험 속도에 도달하지 않으려면 d_o 를 증가시키고 축의 길이 L 을 최소화 하여 정지상태에서 정격 운전속도까지 고유진동수에 도달하지 않도록 설계하여야 한다. 또한 HTS 위험 속도 부근으로 회전수가 도달할 때 회전자 코일의 변위가 급격히 증가하므로 코일과 진공 용기 간의 좁은 공간간 접촉 및 간섭이 일어날수 있어 위험 속도 또한 본 연구의 안전계수 2 를 기준으로 정격 회전수 값의 2 배를 설정했다.

3.4. 열/기계적 설계요소의 상관관계 도출

3.1부터 3.3까지의 관계식과 설계 결과를 종합적으로 분석하면, 전도 열 부하, 전단 응력, 고유 진동수는 모두 외직경 d_o 와 길이 L 에 대해 영향을 받는 것을 알 수 있다. 열 부하를 최소화하려면 d_o 를 작게 유지해야 하지만, 토크와 위험 속도에 대한 안정성을 확보하려면 d_o 를 증가시켜야 한다. 또한 길이 L 은

열 부하를 감소시키지만 고유 진동수를 낮추므로, 이를 적절히 조정해야 한다. 식 (2)와 (12)에서 L 은 비례변수 이고 (2),(6),(12)에서 d_o 는 제곱 비례 이상의 변수들이므로 결국 지지부의 길이보다 외경의 크기에 따라서 영향이 큰 것을 알 수 있다.

4. 설계 결과 및 분석

4.1. 적용 소재별 지지부 설계결과

본 연구에서 HTS 회전자의 코일은 8 개이고 정격 운전시 회전수가 3,000 RPM이므로 위험 속도는 48,000 RPM 이다. 따라서 d_o 와 L 을 변수로 열부하와 위험 속도의 분포를 확인하였다. Fig. 3과 Fig. 4은 GFRP G 10과 SS304 소재의 외직경 d_o 와 지지부 1개의 길이 L 에 따른 설계결과이다.

GFRP G 10의 경우 폴리머와 유리섬유를 적층한 복합소재의 특성을 고려하여 인장강도를 적용하면 240 MPa 이다. 안전계수 2를 적용한 허용 최대응력은 120 MPa이다. 또한 SS304 대비 탄성계수가 상대적으로 낮아 d_o 와 L 에 따른 위험 속도의 변화폭이 크다. 반면 열전달계수가 낮아 d_o 와 L 의 변화에 따른 열 부하량 변화폭이 낮았다. 결과 그래프에서 3가지 요소를 고려한 최적 설계치는 d_o 는 73 mm, L 은 38 mm, 지지부 양측 총 열 부하는 2.8 W 정도로 나타났다.

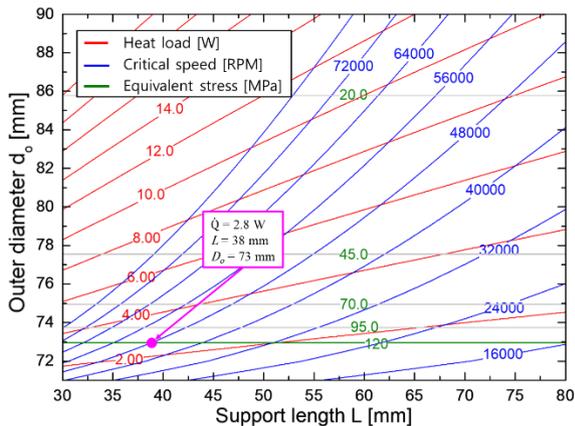


Fig. 3. Thermal load and critical speed graph for the GFRP G 10 support.

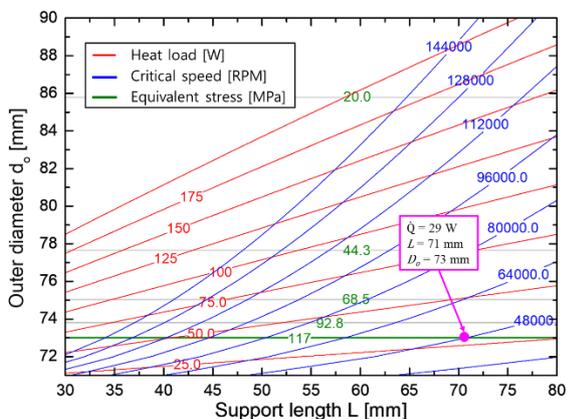


Fig. 4. Thermal load and critical speed graph for the SS 304 support.

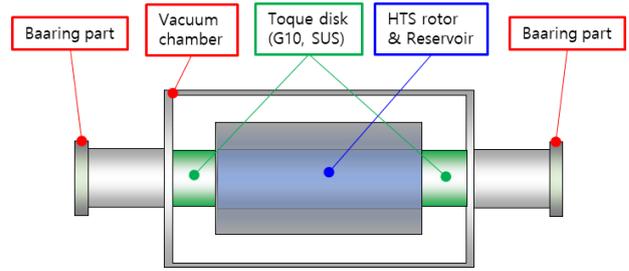


Fig. 5. Geometry of the numerical model for the support structure.

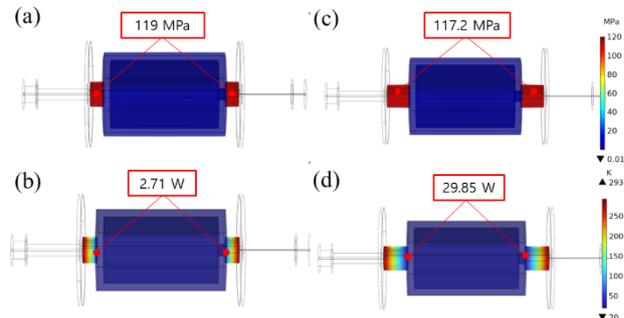


Fig. 6. Thermal load and torque stress results for G 10 and SS 304 supports:

(a) Max. stress in G 10, (b) Heat load in G 10, (c) Max. stress in SS 304, (d) Heat load in SS 304

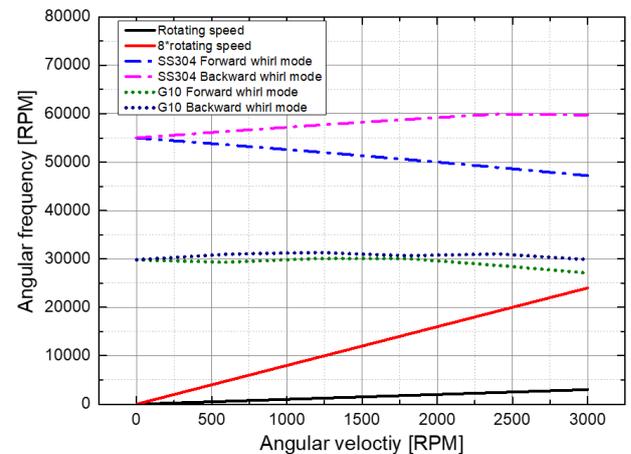


Fig. 7. Campbell chart showing critical speeds of G 10 and SS304 supports with respect to rotational speed.

SS304의 경우 항복강도가 234 MPa 이므로 안전계수 2를 적용한 허용 최대응력은 117 MPa이다. 탄성계수가 상대적으로 높아 d_o 와 L 에 따른 위험 속도의 변화폭이 적지만, 열전달계수가 높아 d_o 와 L 에 따른 열 부하량 및 변화폭이 높았다. 결과 그래프에서 3가지 요소를 고려한 최적 설계치는 d_o 는 73 mm, L 은 71 mm, 지지부 양측 총 열 부하는 29 W 정도로 나타났다.

4.2. 수치해석 모델을 통한 검증

본 연구에서 제시한 회전자의 조건과 물성치 기준을 반영하고 산출된 길이 및 직경에 따라 Fig. 5 처럼 토크대비 응력, 전도열 부하, 고유진동수에 따른 위험 속도를 검토할 수 있는 수치해석 모델을 작성하였다. 모델을 바탕으로

COMSOL Multiphysics® 프로그램을 사용하여 Solid Mechanics, Heat Transfer, Rotordynamics 모듈에 Table 2의 물성치를 각각 적용한 해석을 수행하였다. 해석결과 토크에 대한 최대응력은 G 10과 SS 304는 각각 119 MPa, 117.2 MPa 모두 1% 미만의 오차를 보였고, 열 부하 또한 각각 2.71 W, 29.85 W로 1% 미만의 오차로 결과값이 도출되었다. 이는 열 부하와 토크대비 응력에서는 산출된 설계점과 해석결과가 거의 일치함을 알 수 있다. 고유진동수에 따른 위험 속도는 SS304의 결과에서 가장 먼저 나타나는 모드에서 47,200 RPM으로 설계시 산출된 48,000 RPM 근처에서 나타났으나, G 10의 경우 27,100 RPM으로 설계시 산출된 값에는 미치지 못하였으나 회전수의 8배수인 24,000 RPM보다 높아 적용가능한 수치인 것을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구는 500 kW급 HTS 모터 회전자 지지부 설계를 위해 열적, 구조적, 동적 요구 사항을 종합적으로 분석하고, 최적 설계 방안을 제안하였다. 지지부 설계는 SS304와 GFRP G 10 두 가지 소재를 대상으로 수행되었으며, 각 소재의 열전도도, 강성, 탄성 계수와 같은 물성치를 기반으로 전도 열 부하, 전단 응력, 고유 진동수 간의 상충 관계를 정량적으로 평가하였다. 이를 통해 HTS 모터 설계뿐만 아니라 고출력 및 극저온 환경에서 사용되는 기기의 지지부 설계에 활용 가능한 설계 방법론을 제공하였다. 그러나 본 연구는 1500 RPM의 정격 운전 속도와 293 K 외기 온도를 기준으로 수행되었으며, 다양한 운전 조건에서의 추가 검증이 필요하다. 예를 들어, 고속 운전 및 급격한 온도 변화 조건에서의 설계 안정성을 평가하고, 소재의 비선형 특성 및 제조 공정에서 발생할 수 있는 요인들을 고려하는 연구가 요구된다. 또한, 실제 제작 공정에서 발생할 수 있는 열적 및 구조적 불균일성을 반영한 후속 연구가 필요하다. 향후 연구는 이러한 확장된 조건을 기반으로 HTS 모터 지지부 설계를 더욱 정교화하고, 항공기, 대형 상용차 등 다양한 응용 분야에서의 실용화를 목표로 할 것이다. 이를 통해 HTS 모터 설계 기술의 발전과 상용화를 촉진할 수 있을 것으로 기대한다.

ACKNOWLEDGMENT

This research was supported by Changwon National University in 2023~2024.

REFERENCES

- [1] B. J. Brelje and J. R. R. A. Martins, "Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches," *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 104, pp. 1-19, 2018.
- [2] T. Bærheim, J. J. Lamb, J. K. Nøland, and O. S. Burheim, "Potential and Limitations of Battery-Powered All-Electric Regional Flights—A Norwegian case study," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 9, no. 1, pp. 1809-1825, 2022.
- [3] B. Liu, R. Badcock, H. Shu, and J. Fang, "A Superconducting Induction Motor with a High Temperature Superconducting Armature: Electromagnetic Theory, Design and Analysis," *Energies*, vol. 11, no. 4, pp. 792, 2018.
- [4] P. J. Masson, D. S. Soban, E. Upton, J. E. Pienkos, and C. A. Luongo, "HTS Motors in Aircraft Propulsion: Design Considerations," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 15, no. 2, pp. 2218-2221, 2005.
- [5] U. Bong, et al., "Investigation on key parameters of NI HTS field coils for high power density synchronous motors," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, 2021.
- [6] D. -V. Le, G. -D. Nam, S. -J. Lee, and M. Park, "Conceptual Design of an HTS Motor for Future Electric Aircraft," *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 25, no. 5, pp. 49-57, 2020.
- [7] B. B. Gamble, S. Kalsi, G. Snitchler, D. Madura, and R. Howard, "The status of HTS motors," *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, Chicago, IL, USA, pp. 270-274, 2002.
- [8] Y. Zhou, H. Su, Y. Dai, W. Chen, and F. Xie, "Design and research of torque tube used in HTS motor," *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, vol. 19, no. 4, pp. 350-354, 2014.
- [9] H. Moon, Y. -C. Kim, H. -J. Park, I. -K. Yu, and M. Park, "An introduction to the design and fabrication progress of a megawatt class 2G HTS motor for the ship propulsion application," *Superconductor Science and Technology*, vol. 29, no. 3, pp. 034009, 2016.
- [10] K. Kim, S. Hahn, B. Min, K. -D. Sim, Y. Kim, and S. Kim, "Liquid hydrogen cooling system for 100 kW-Class HTS rotor thermal design," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 34, no. 5, pp. 1-5, 2024.
- [11] K. Yamaguchi, et al., "Study of HTS Machine system Cooling with a Closed-Loop Thermosyphon: Stability of unsteady heat load and transient conduction," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 26, no. 3, pp. 1-5, 2016.
- [12] D. S. Dezhin and I. N. Dezhina, "Development of the future aircraft propulsion system based on HTS electrical equipment with liquid hydrogen cooling," *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 32, no. 4, pp. 1-5, 2022.
- [13] "Cryogenic material properties 304 Stainless," Accessed: Dec. 01, 2024, [Online]. Available: https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/304Stainless/304Stainless_rev.htm.
- [14] "Cryogenic material properties G-10 CR," Accessed: Dec. 01, 2024, [Online]. Available: https://trc.nist.gov/cryogenics/materials/G-10%20CR%20Fiberglass%20Epoxy/G10CRFiberglassEpoxy_rev.htm.
- [15] Ravi-Chandar, Krishnaswamy, and Sikhanda Satapathy, "Mechanical Properties of G-10 Glass-Epoxy Composite," ???, ???, 2007.
- [16] S. -H. Lee, S. -W. Song, M. -J. Jeong, W. -H. Kim, and D. -H. Jung, "A novel sleeve design to reduce the eddy current loss of high-speed electrical machines," *Machines*, vol. 11, no. 7, pp. 756, 2023.