



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

무절연계 권선기술을 적용한
고온초전도 마그네틱의 비동기
회전자계에 대한 전자기적 특성 해석

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 電氣工學專攻

蔡允碩

2021 年 8 月

무절연계 권선기술을 적용한
고온초전도 마그네티의 비동기
회전자계에 대한 전자기적 특성 해석

指導教授 金 鎬 民

蔡 允 碩

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2021 年 08 月

蔡允碩의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ ㉠

委 員 _____ ㉠

委 員 _____ ㉠

濟州大學校 大學院

2021 年 08 月

Electromagnetic Characteristic Analysis of
HTS Magnet by No-insulation Winding
Technique inside Asynchronous Rotating
Magnetic Field

Yoon Seok Chae
(Supervised by professor Ho Min Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL JEJU NATIONAL
UNIVERSITY

2021. 08.

목 차

LIST OF FIGURES	iii
LIST OF TABLES	v
LIST OF SYMBOLS	vi
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
1.1. 연구배경 및 필요성	1
1.2. 연구 목적 및 연구 내용	3
II. 고온초전도 마그네틱의 무절연 권선기술	4
2.1. 무절연 권선기술을 적용한 고온초전도 마그네틱의 전자기 특성	4
2.2. 무절연 고온초전도 마그네틱의 권선기술과 등가회로	6
2.3. 무절연 고온초전도 마그네틱의 회로 파라미터를 구하기 위한 실험 방법	8
III. 컴퓨터 해석 결과와 고찰	10
3.1. 고온초전도 마그네틱과 고정자 사양	10
3.2. 비동기 회전자계에서 고온초전도 마그네틱의 자기장 분포 해석 결과 및 고찰	12
IV. 실험 결과 및 고찰	17
4.1. 고온초전도 마그네틱의 비동기 회전자계에 대한 전자기 특성 평가 장치의 구성	17
4.2. 임계전류 측정실험과 순간 방전 실험 결과 및 고찰	19
4.3. 비동기 회전자계에서 임계전류 측정실험 결과와 고찰	24
4.3.1. 임계전류와 n-value 측정 결과	24
4.3.2. 전압 측정 결과	28
4.3.3. 중심 자기장 측정 결과	31
4.3.4. 비동기 회전자계에서 임계전류 측정실험의 고찰	34

4.4. 충전된 고온초전도 마그네티에 비동기 회전자계 인가 실험 결과 및 고찰	35
4.4.1. 충전된 고온초전도 마그네티에 비동기 회전자계 인가 실험 결과	35
4.4.2. 충전된 고온초전도 마그네티에 비동기 회전자계 인가 실험의 고찰	37
V. 결론	38
참 고 문 헌	40
감사의 글	42

LIST OF FIGURES

Fig. 1 Schematic diagram of bypass current on 2G HTS magnet	5
Fig. 2 Electrical equivalent circuit model of insulation HTS magnet	7
Fig. 3 Electrical equivalent circuit model of no-insulation HTS magnet	8
Fig. 4 Photos of two HTS magnets and stator (a) MI magnet, (b) NI magnet and (c) stator	10
Fig. 5 Two-dimensional model of two HTS magnets (a) NI magnet (b) MI magnet	12
Fig. 6 Comparison of maximum perpendicular flux density of NI magnet, charged at $I_f = 100$ A, between the various field conditions.	14
Fig. 7 Comparison of maximum perpendicular flux density of MI magnet, charged at $I_f = 100$ A, between the various field conditions.	14
Fig. 8 Comparison of maximum perpendicular flux density of NI magnet according to current on the various field conditions	16
Fig. 9 Comparison of maximum perpendicular flux density of MI magnet according to current between synchronous and asynchronous condition ..	16
Fig. 10 Scheme of experiment setup	18
Fig. 11 Photograph of experiment setup	18
Fig. 12 I-V experiment curve of NI magnet	20
Fig. 13 I-V experiment curve of MI magnet	20
Fig. 14 Experiment results on sudden discharge test of NI magnet	21
Fig. 15 Experiment results on sudden discharge test of MI magnet	21
Fig. 16 Normalized central flux density versus elapsed time curve for NI magnet	22
Fig. 17 Normalized central flux density versus elapsed time curve for MI magnet	22
Fig. 18 Critical current color map for NI magnet	25
Fig. 19 Critical current color map for MI magnet	25
Fig. 20 N-value color map for NI magnet	26
Fig. 21 N-value color map for MI magnet	26
Fig. 22 I-V curve for NI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field	29
Fig. 23 I-V curve for MI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field	29

Fig. 24 Heat generation curves for NI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field	30
Fig. 25 Heat generation curves for MI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field	30
Fig. 26 I-B and V curve for NI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field	32
Fig. 27 I-B and V curve for MI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field	33
Fig. 28 Current, central magnetic field, terminal voltage results of NI magnet with $I_f = 100$ A applying the asynchronous rotating magnetic field with 10 Hz	36
Fig. 29 Current, central magnetic field, terminal voltage results of MI magnet with $I_f = 100$ A applying the asynchronous rotating magnetic field with 10 Hz	36

LIST OF TABLES

Table 1. Various winding technology to improve stability for 2G HTS magnet	5
Table 2. Specification of REBCO CC tape	11
Table 3. Specification of HTS magnets	11
Table 4. Specification of stator	11
Table 5. Parameters of two HTS magnets	23
Table 6. Degradation rate of critical current and n-value for NI magnet by various asynchronous rotating magnetic field	27
Table 7. Degradation rate of critical current and n-value for MI magnet by various asynchronous rotating magnetic field	28

LIST OF SYMBOLS

R_c	접촉저항 (Ω)
R	직렬저항 (Ω)
R_{HTS}	고온초전도 선재의 저항 (Ω)
L	고온초전도 마그넷의 인덕턴스 (H)
J_c	임계전류밀도 (A/mm^2)
I_f	직류 운전전류 (A)
I_a	전기자 운전전류 (A)
I_c	임계전류 (A)
I_{HTS}	고온초전도 선재에 통전전류 (A)
I_r	턴 간 우회전류 (A)
I_{op}	운전전류 (A)
I_c	임계전류 (A)
I_{c0}	비동기 회전자계가 없을 때 측정된 임계전류 (A)
I_{c1}	비동기 회전자계가 인가된 상태에서 측정된 임계전류 (A)
E_c	임계전계 (V/cm)
V_c	임계전압 (V)
V_L	유도 기전력 (V)
V_{HTS}	고온초전도 선재의 전압 (V)
V_t	고온초전도 마그넷의 단자 전압(V)
B	중심 자기장 (T)
B_m	최대 중심 자기장 (T)
B_c	임계 자기장 (T)
B_{\perp}	수직 자기장 (T)
T_c	임계 온도 (K)
τ	시정수 (sec)
n	n-value
n_0	비동기 회전자계가 없을 때 측정된 n-value
n_1	비동기 회전자계를 인가했을 때 측정된 n-value
Q	시간에 따른 누적 발열량 (J)
f	주파수 (Hz)
V_2O_3	산화바나듐
STS	스테인리스 강
HTS	고온초전도체

REBCO	희토류 계열 2세대 고온초전도체
NI	무절연 마그넷
MI	금속절연 마그넷
FEA	유한요소해석

SUMMARY

The high-temperature superconducting (HTS) generator for wind turbine has been generally built with the synchronous type. In structure of partially HTS generator (HTSG), copper wire is used to manufacture three-phase armature winding installed in stationary part and generates the alternating current (AC) magnetic field which is circumferentially rotated around the rotor. Moreover, the rare earth barium copper oxide (REBCO) coated conductors are the so-called second generation HTS tapes, which are used at field winding in rotary part and generates the direct current (DC) magnetic field.

An HTS field winding is operated inside static magnetic field because it is always synchronized with AC magnetic field generated from armature winding during the steady-state operation of synchronous generator. However, the HTS field winding of synchronous generator can be occasionally operated under the time-varying magnetic field due to the unsynchronized operation of armature winding during electrical or mechanical load fluctuations. Especially, in application for wind turbine, the driving situations in which the rotational frequency between the armature and field windings is asynchronous, may occur because the wind speed is drastically changed in real time. Thus, the HTS field winding becomes unstable state due to being subjected to a time-varying magnetic field.

As the transient conditions mentioned above, conventional HTS magnet, which is insulated with the electrically and thermally non-conductive materials between turn to turn, has been suffered from the local quench, resulting in permanent damage. The novel electrical insulation winding techniques, such as no-insulation (NI) and metal insulation (MI) in which an insulation material is completely removed between turns and the electrically and thermally conductive metals are inserted between turns, respectively, were proposed to improve the stability of HTS magnets by solving the critical drawback of conventional insulation winding

technique.

However, the practical demonstration of NI or MI magnets for the field winding of HTSG and their behaviors under unsynchronized magnetic field, have not yet been conducted and studied on, respectively. Therefore, the transient operational reliabilities of NI and MI magnets should be examined and investigated under unsynchronized operation environments to confirm their technical feasibility on the HTS field winding of the generator for wind turbine.

This study presents the results about analysis and experiment on the electromagnetic characteristics of two kinds of REBCO magnet, such as NI magnet and MI magnet co-wound with stainless steel (STS) tape, under rotating magnetic field.

By using two-dimensional finite element analytical approach, the magnetic behaviors of two test magnets, i.e., perpendicular magnetic field effect, were numerically analyzed and compared considering synchronous and asynchronous operations of the HTSG. Then, a characteristic evaluation device to apply asynchronous rotating magnetic field was designed and developed. The system is divided into two parts. One is a cryostat part to test the two magnets at 77K in liquid nitrogen batch, the other is three phase armature winding part to generate the rotating magnetic field with controllable parameters. The electromagnetic characteristics of two test magnets, such as critical current, n -value, terminal voltage, and center magnetic field, are experimentally investigated according to the changes in strengths and frequencies of the asynchronous rotating magnetic field. Finally, experimentally comparative results of two test magnets were discussed in terms of the HTS field winding of the superconducting generator for wind turbine.

I. 서론

1.1. 연구배경 및 필요성

전 세계적으로 신재생 에너지원 확대를 통한 온실가스 감축이 지구온난화 문제 개선을 위한 핵심 과제로 활발히 논의되고 있다. 동시에 기존의 전력 생산 방식과 경쟁 가능한 수준의 경제성을 가지는 친환경 발전단지의 건설이 가능하게 되었다. 이에 따라 전 세계는 경쟁적으로 풍력발전 시설을 이용한 친환경 에너지 생산에 큰 관심을 보이고 있다. 최근 풍력발전 산업의 동향은 경제성 높은 풍력발전 단지의 건설을 위해 점차 해상화, 대형화 추세를 보인다. 그리고 대규모 해상풍력발전에 적합한 풍력터빈의 대용량화 추세에 부합하는 새로운 개념의 시스템 개발 필요성이 요구되고 있다 [1].

대용량 풍력발전기 개발을 위한 유망 기술로써 초전도체를 사용한 초전도 풍력발전기의 연구개발이 시도되고 있다. 초전도체는 특정 온도, 자기장, 전류밀도에 대한 임계값을 갖는다. 세 임계값 이내에서 초전도체는 저항이 0이 되는 특성이 있다. 이러한 특성을 이용하면 초전도체는 구리 도선 대비 4000배 이상의 전류밀도를 갖게 된다. 그리고 이러한 초전도체를 풍력발전기의 계자 권선에 사용하면 초전도 풍력발전기는 이론상 종래의 발전기보다 동일 용량에서 40% 수준의 크기와 33% 수준의 무게로 줄일 수 있어 소형·경량화가 가능하다. 또한 구리도체를 사용한 상전도 계자 권선에서 발생하는 동손을 70 % 가량 줄일 수 있어 기존 발전기 대비 1~2% 가량 기기효율을 높일 수 있는 장점이 있다 [2].

풍력터빈용 초전도 발전기는 계자 권선으로 초전도 마그넷을 사용한다. 풍속과 풍향은 실시간으로 변하기 때문에 풍력발전기의 출력도 실시간으로 변한다. 풍력발전기의 출력변동은 전기자에서 발생하는 회전자계의 변화를 발생 시킨다. 그러므로 풍력발전기에 사용하는 초전도 마그넷은 변동하는 회전자계에서 운전될 수 있다. 시변하는 회전자계가 초전도 마그넷에 인가되면 저항이 0인 초전도 상태가 큰 저항이 발생하는 상전도 상태로 전이하는 퀘치 (quench) 현상이 발생할 수 있다. 만약 퀘치가 발생한 초전도 마그넷이 초전도 상태로 회복이 불가능하면, 초전도 마그넷은 영구 손상이 발생한다. 초전도 마그넷이 영구 손상 되면 초전도 풍력발전기에서 큰 비용을 차지하는 초전도 마그넷을 교체해야 한다.

이에 따라 풍력발전기의 운전이 불가능한 상황에 빠질 수 있다. 이는 초전도 풍력발전기 뿐만 아니라 초전도 전동기에도 해당되는 부분이다. 일례로, 수 MW급의 초전도 회전기의 시운전 단계에서 초전도 계자 권선의 영구손상이 발생한 실증 사례가 있다 [3].

기존 개발된 초전도 풍력발전기와 초전도 전동기의 계자 권선은 고전적인 방법으로 제작된 초전도 마그넷을 사용하였다. 고전적으로 초전도 마그넷을 제작할 때 열·전기 전도성이 없는 폴리이미드 필름 (polyimide film)으로 절연한다. 초전도 마그넷은 초전도체의 임계 특성상 다양한 내·외란 조건에 의해 퀘칭 현상이 발생할 수 있다. 이때 폴리이미드 필름으로 절연된 초전도 마그넷은 국부적 발열의 분산이 매우 작고 인접된 턴으로 전류 분류가 불가능하다. 따라서 전기 절연된 초전도 마그넷에 퀘칭 현상이 발생하면 초전도 마그넷의 영구손상이 발생할 가능성이 크다.

초전도 마그넷의 영구손상 문제를 해결하고, 초전도 마그넷의 동작 신뢰성을 높여, 초전도 기기 상용화를 위해서 무절연계 권선기술이 제안되었다 [4], [5]. 무절연계 권선기술은 기존에 문제가 되었던 전기절연물을 제거하여 초전도 마그넷을 제작하는 기술이며, 특히 2세대 희토류 계열 고온초전도 선재(rare earth barium copper oxide, REBCO)로 제작된 고온초전도 마그넷을 대상으로 한다. 무절연계 권선기술의 요지는 턴 간의 열 저항과 전기 저항이 작은 고온초전도 마그넷을 만드는 것이다. 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷은 퀘칭이 발생할 경우 인접한 턴으로 전류를 우회시키고 발열을 분산시킴으로써 자기보호가 가능하다. 최근 국내에서 10 MW급 풍력발전기용 고온초전도 계자 권선 제작에 무절연계 권선기술을 적용하여 안정도 향상을 도모한 개발 사례가 있다 [6]

하지만, 현재까지 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷을 사용하는 회전기의 실증은 없다. 그러므로 풍력발전기의 운전환경에서 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷의 시험 데이터 또한 없는 실정이다. 그러므로 풍력발전기의 운전환경에서 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷의 전자기 특성의 검토가 필요하다.

1.2. 연구 목적 및 연구 내용

고온초전도 풍력발전기가 풍향, 풍속 변화에 따라 출력이 크게 변동될 때, 고온초전도 풍력발전기의 계자 권선용 고온초전도 마그네티는 비동기 회전자계의 영향을 받아 안정도 저하가 예상된다. 이때, 무절연계 권선기술을 고온초전도 풍력발전기에 적용하면 비동기 회전자계가 인가된 상황에서도 계자 권선용 고온초전도 마그네티를 보호하기 위한 전자기 특성을 보일 것이며, 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그네티는 비동기 회전자계 영향의 유·무에 따라 전자기 특성의 차이가 나타날 것으로 예상된다.

본 논문에서는 풍력발전기 운전상황 중 비동기 회전자계를 모사할 수 있는 시험 장치를 개발하였다. 그리고 시험 장치를 사용하여 비동기 회전자계에 대한 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그네티의 전자기 특성평가 실험을 수행하였다. 전자기 특성평가 실험은 무절연 마그네티와 스테인리스 강 (stainless steel, STS) 테이프를 이용한 금속절연 마그네티를 대상으로 하였다.

본 논문의 연구 내용은 시변 회전자계 환경에서 측정이 어려운 고정자 내부의 자기장 분포를 2차원 유한요소 해석을 사용하여 비동기 상태와 동기 상태에서 고온초전도 마그네티가 받는 자기장 영향을 비교하였다. 다음으로 비동기 회전자계가 인가되지 않은 환경에서 제작된 두 종류의 고온초전도 마그네티의 등가회로 파라미터를 구하기 위하여 임계전류 측정실험과 순간 방전 실험을 수행하였다. 마지막으로 비동기 회전자계에서 제작된 두 종류의 고온초전도 마그네티의 전자기 특성 실험을 수행함으로써 비동기 회전자계에서 두 종류의 마그네티의 안정도 변화와 전자기적 특성 변화를 확인하였다.

본 논문은 고온초전도 마그네티에 비동기 회전자계를 쉽게 인가하기 위하여 고온초전도 마그네티를 물리적으로 고정된 시험평가 장치를 사용하였다. 비동기 회전자계 시험환경은 3상 전력변환장치를 사용하여 전기자에서 발생하는 회전자계만으로 모사하였으며, 시험에 사용된 전력변환장치는 제어기능이 시험평가 장치를 위해 제작된 것이 아니라 실제 풍력발전기와 같은 풍속변동에 따른 출력변동 상황을 완전히 모사하지 못하는 한계점이 있다.

II. 고온초전도 마그넷의 무절연 권선기술

2.1. 무절연 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷의 전자기 특성

마그넷의 기자력은 감긴 턴 수와 운전전류에 비례한다. 그러므로 기존의 구리 도체를 사용하는 상전도 마그넷은 턴 간을 전기절연하여 턴 간을 구분하여야만 턴 수에 비례하는 기자력을 발생시킬 수 있다. 그러므로 상전도 마그넷에서 절연은 매우 중요하다. 반면, 초전도 마그넷은 임계 온도 (T_c), 임계 자기장 (B_c), 임계 전류밀도 (J_c)로 구성된 세 가지 임계값 이내의 안정적인 운전조건에서 초전도 현상이 발현하여 저항이 '0'이 된다. 초전도 코일의 권선 턴 간을 절연하지 않아도 초전도 코일의 권선 간 접촉면에서 나타나는 저항보다도 초전도 선재층의 저항이 훨씬 작다. 그러므로 전기절연물이 없어도 상대적으로 큰 접촉저항 때문에 초전도 선재의 턴 간이 구분된다. 그러므로 무절연 권선의 초전도 마그넷은 감긴 초전도 선재의 턴 수와 운전전류에 비례하는 기자력을 발생할 수 있다.

무절연 권선기술을 적용한 초전도 마그넷은 자기보호(self-protecting) 효과를 가지는 이점이 있다 [4], [5]. Fig. 1은 무절연 마그넷의 자기보호 효과를 나타내고 있다. 무절연 마그넷은 내·외란 조건에서 초전도 선재 내부에 국부적인 퀵치가 발생하여 저항이 발생될 수 있다. 이때, 무절연 마그넷은 턴 간이 절연되지 않았기 때문에 초전도층으로 흐르던 전류가 선재 사이의 금속 접촉면 통해서 저항이 상대적으로 낮은 인접한 턴으로 흐를 수 있다. 그러므로 국부적으로 저항이 발생한 초전도층을 통과하는 전류 크기가 감소한다. 결과적으로 저항이 생겨난 초전도 선재 중 금속층에 전류가 흘러 발열이 축적되어 커지는 상황에서 초전도 마그넷을 보호할 수 있다

하지만, 무절연 권선기술은 초기 전류 충전 시에도 턴 간으로 전류가 분류되어 자기장의 충전 지연 현상이 발생한다. 대형 초전도 마그넷으로 갈수록 인덕턴스가 증가하여 시정수가 길어지기 때문에 목표 자기장까지 충전하는 시간이 길어지고 자기장을 빠르게 제어하기가 어려운 문제가 발생한다. 이 문제점을 개선하기 위해 금속절연 권선기술이 제안되었다 [7], [8]. 금속절연 권선기술의 요지는 무절

연 권선기술 대비 큰 접촉저항을 만들기 위해 고온초전도 선재와 금속 테이프를 동시에 권선하여 마그넷의 턴 간을 금속으로 절연하는 것이다. 이 밖에도 금속-절연체 전이 물질 중 하나인 vanadium(III) oxide (V_2O_3)를 사용하여 열적으로 안정된 상황에서는 기존의 절연 마그넷에서처럼 자기장의 충전지연 없이 동작하고 열적으로 불안정하면 무절연 마그넷과 같이 초전도 층의 전류 분류 현상이 발생하여 마그넷 안정화 특성을 갖는 스마트 절연 권선기술이 개발되고 있다 [9]. 현재까지 개발 중인 2세대 고온초전도 선재를 사용한 마그넷의 안정도 향상을 위한 권선기술에 대한 비교 요약을 Table 1에 정리하였다.

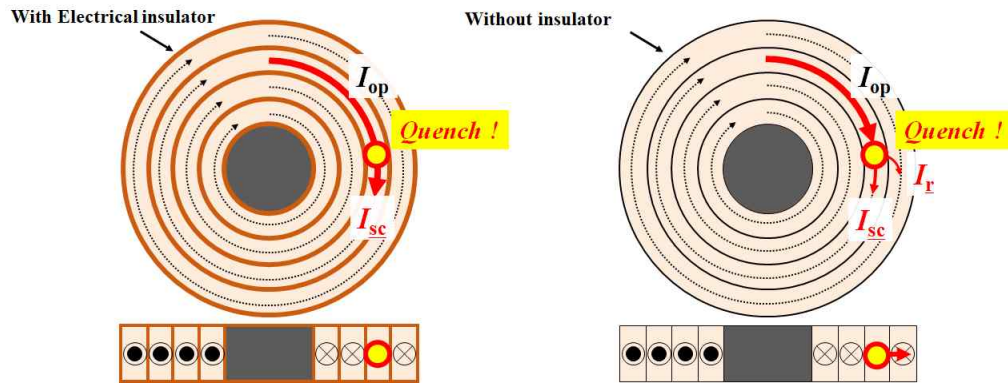


Fig. 1 Schematic diagram of bypass current on 2G HTS magnet

Table 1. Various winding technology to improve stability for 2G HTS magnet

	No-insulation	Partial insulation	Metal-insulation	Smart insulation
Method	Winding technique using only HTS wire without insulation [4], [5].	Winding technique with insulation at regular turn intervals [10].	Co-winding technique using metal tape [7], [8].	Co-winding technique using metal-insulator transition materials [9].
Characteristics	When local quenching	Similar to no-insulation	Similar to the no-insulation	The contact resistance

occurs inside the HTS magnet, the HTS magnet can be protected from permanent damage by passing current between turns.	magnet, but partially unable to bypass current between turns.	magnet, but there are differences in bypass current between turns depending on materials, surface roughness, and winding tension of metal tape.	depends on temperature. When the HTS magnet is low temperature, it has insulation magnet characteristics because of high contact resistance. On the contrary, when the HTS magnet is high temperature, it has no-insulation magnet characteristics because of low contact resistance.
---	---	---	---

2.2. 무절연 고온초전도 마그넷의 권선기술과 등가회로

고온초전도 선재의 전압 (V_{HTS})은 임계전계 (E_c) 1 $\mu\text{V}/\text{cm}$ 를 기준으로 산정되는 임계전압 (V_c)과 그 임계전압이 발생하는 고온초전도 선재의 통전전류 (I_{HTS})인 임계전류 (I_c) 그리고 전압의 상승의 기울기를 나타내는 첨예도 상수 n-value (n)에 의하여 식 (1)로 표현한다 [11].

$$V_{HTS} = V_c (I_{HTS}/I_c)^n \quad (1)$$

등가회로에서 고온초전도 선재의 저항 (R_{HTS})은 간단히 V_{HTS} 를 I_{HTS} 로 나눈 식 (2)로 표현한다. 일반적으로 고온초전도 선재 사이에 절연이 되어 여러 턴으로 구

성된 경우 고온초전도 마그넷의 인덕턴스 (L)가 추가되어 최종적으로 Fig. 2와 같이 R-L 직렬 등가회로로 나타낼 수 있다. 이때, I_{HTS} 은 고온초전도 마그넷의 운전 전류 (I_{op})와 같다. 고온초전도 마그넷의 단자 전압 (V_t)은 V_{HTS} 과 L 에 의한 유도 기전력(V_L) 식 (3)의 합으로 식 (4) 같이 나타낼 수 있다.

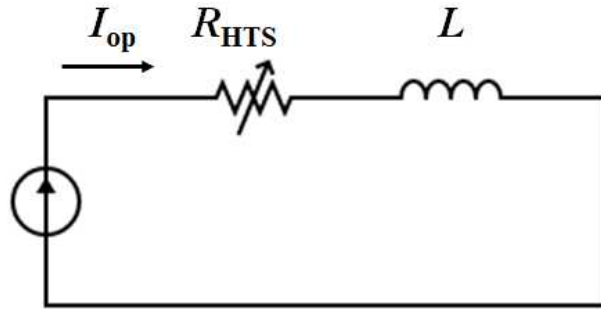


Fig. 2 Electrical equivalent circuit model of insulation HTS magnet

$$R_{HTS} = V_{HTS} / I_{HTS} \quad (2)$$

$$V_L = L \frac{dI_{HTS}}{dt} \quad (3)$$

$$V_t = V_{HTS} + V_L \quad (4)$$

무절연 마그넷은 맞닿는 선재 면에 접촉저항이 생긴다. 무절연 마그넷의 등가회로에서 접촉저항은 절연 마그넷의 등가회로에서 병렬 저항을 추가한 것으로 표현할 수 있다 [12]. 따라서 무절연 마그넷의 등가회로는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 그리고 병렬회로의 전압은 동일하므로 V_{HTS} 와 V_L 의 합은 접촉저항에 턴 간 유효전류 (I_t)가 통전하여 발생하는 전압과 같다. 따라서 무절연 고온초전도 마그넷의 전압은 식 (5)와 같다. 여기서 주의할 점은 식 (6)과 같이 I_{op} 는 I_{HTS} 와 I_t 로 분기한다.

고온초전도 마그넷의 턴 간에 다양한 금속 도체를 사용하여 접촉저항 (R_c)을

갖는 고온초전도 마그넷은 무절연 마그넷의 등가회로를 따르며 회로의 R_c 는 대체로 무절연 마그넷의 R_c 보다 증가한 값을 갖는다 [18].

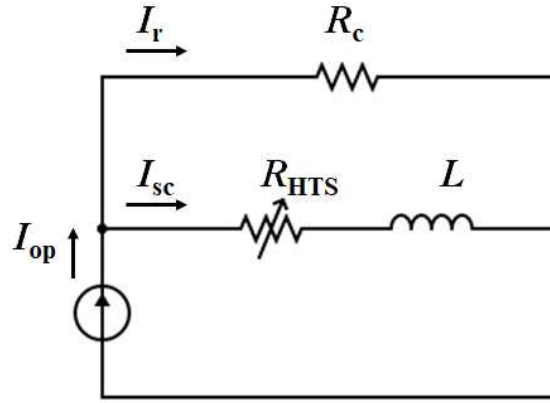


Fig. 3 Electrical equivalent circuit model of no-insulation HTS magnet

$$V_{HTS} + V_L = R_c I_r \quad (5)$$

$$I_{op} = I_{HTS} + I_r \quad (6)$$

2.3. 무절연 고온초전도 마그넷의 회로 파라미터를 구하기 위한 실험 방법

임계전류 측정실험은 고온초전도 마그넷에 일정한 기울기로 직류 전류를 충전할 때 고온초전도 마그넷의 단자 전압이 임계전압에 도달한 시점에서 고온초전도 마그넷의 운전전류를 측정하는 실험이다. 2세대 고온초전도 선재를 사용한 절연된 고온초전도 마그넷의 임계전압은 임계전계 $1 \mu\text{V}/\text{cm}$ 를 기준으로 산정한다. 무절연계 고온초전도 마그넷에서 턴 간 우회 전류의 측정은 기술적으로 어렵기 때문에 절연된 고온초전도 마그넷과 같이 고온초전도 선재의 통전전류 대신 고온초전도 마그넷의 운전전류를 측정하여 임계전류와 n-value를 구한다. 본 논문에서는 전압의 기울기 성분을 반영하기 위해 식 (4)에서 직렬저항 (R)을 추가한 식 (7)로 변형하였다.

$$V_t = V_c(I_{op}/I_c)^n + V_L + RI_{op} \quad (7)$$

순간 방전 실험은 고온초전도 마그넷을 목표 중심 자기장 (B)까지 충전한 후 고온 초전도 마그넷의 운전전류를 차단했을 때, 중심 자기장이 자연방전 되어 최대 중심 자기장 (B_m)의 크기가 36.8 %에 도달한 순간의 경과시간을 측정하여 고온초전도 마그넷의 시정수 (τ)를 구하는 실험이다. 무절연 마그넷은 접촉저항에 따라 전류 우회 양상이 변하기 때문에 전자기 특성이 변한다. 그러므로 무절연 마그넷은 순간 방전 실험을 수행하여 시정수를 구하고 접촉저항을 계산해야 한다. 식 (8)은 고온초전도 마그넷의 중심 자기장의 자연방전을 나타낸 식이다. 시정수는 식 (9)와 같이 접촉저항과 인덕턴스의 관계식으로 표현된다. 순간 방전 실험으로부터 구한 시정수와 식 (3)을 사용하여 구한 인덕턴스를 식 (9)에 대입하면 마그넷의 접촉저항을 계산할 수 있다.

$$B = B_m e^{t/\tau} \quad (8)$$

$$\tau = L/R_c \quad (9)$$

III. 컴퓨터 해석 결과와 고찰

3.1. 고온초전도 마그넷과 고정자 사양

Fig. 4는 무절연 마그넷 (a), 금속절연 마그넷 (b), 그리고 고정자 (c) 모습을 각각 나타내었다. Table 2에 무절연계 고온초전도 마그넷의 제작에 사용된 REBCO 선재의 사양을 나타내었다. 국내 REBCO 선재 제조사인 SuNAM의 $140\pm 15\ \mu\text{m}$ 의 두께와 4 mm 폭을 갖는 SCN04150 모델 선재를 사용하였다. Table 3에서는 수치해석과 전자기 특성 실험에 사용된 두 종류의 고온초전도 마그넷의 사양을 나타냈다. 고온초전도 마그넷용 보빈은 베크라이트 재료를 사용하여 race-track형상의 single pancake 구조로 제작하고, 보빈 중앙에 중심 자기장 측정을 위해 홀센서용 지그를 설치하였다. 두 종류의 고온초전도 마그넷은 6턴으로 제작하였으며, 금속절연의 경우 매 턴마다 4 mm 폭, $100\ \mu\text{m}$ 의 두께를 갖는 스테인리스 (STS) 테이프를 겹쳐서 권선하였다. Table 4은 비동기 회전자계를 발생시키기 위한 고정자의 사양 나타내었다.

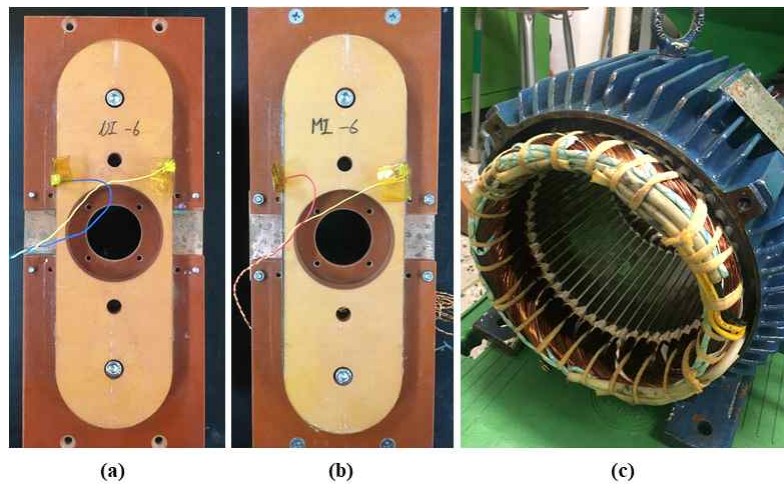


Fig. 4 Photos of two HTS magnets and stator (a) MI magnet, (b) NI magnet and (c) stator

Table 2. Specification of REBCO CC tape

Parameters	Values
Manufacturer	SuNAM Co. Ltd
Conductor model	SCN04150
Conductor Width (mm)	4.1±0.1
Conductor thickness (μm)	140±15
Critical current Max./Min (A)	264/260

Table 3. Specification of HTS magnets

Parameters	Value	
	MI	NI
Winding tension of HTS(STS) (kgf)	10(10)	10(-)
Number of turns	6	6
Insulation	Stainless Steel	
Insulation thickness (μm)	100	
Conductor length (cm)	283.9	283.9
Inner radius @ curvature (mm)	30	30
Outer radius @ curvature (mm)	31.5	30.9
Length of straight portion (mm)	140	140
Criterion voltage (μV)	283.9	283.9

Table 4. Specification of stator

Parameters	Values
Inner core diameter (mm)	181
Outer core diameter (mm)	267
Type of steel	50PN400
Length of stator core (mm)	150
Number of poles	4
Number of slots	48
Conductor per slot	50

3.2. 비동기 회전자계에서 고온초전도 마그넷의 자기장 분포 해석 결과 및 고찰

동기 상태와 비동기 상태에서 고온초전도 마그넷의 자기장 분포 해석에는 상용 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 프로그램인 ANSYS사의 Electronics Desktop 19.0를 사용하였다. 해석 방법은 총 3가지로 첫 번째 회전자계 영향이 없을 때 마그넷 권선 주변의 자기장 분포를 해석하였다. 두 번째로 회전하고 있는 마그넷이 고정자 전기자 권선의 회전자계와 동기화된 상태에서 마그넷 권선의 자기장 분포를 해석하였고, 마지막으로 회전하고 있는 마그넷이 비동기 회전자계를 받는 상태에서 자기장 분포를 해석하였다.

Fig. 5에는 1/4 주기 동안 회전자 내부의 자기장 분포를 2차원 해석 모델로 보여준다. 2D 해석 결과 중 전기자 권선에서 발생시킨 자기장의 크기는 전기자 전류의 입력 주파수에 무관하므로 해석 조건을 단순화하기 위하여 한 주기 (1 sec) 동안 1 Hz 주파수의 동기화된 자기장 분포와 비동기화된 자기장 분포를 각각 해석하였다. REBCO 고온초전도 선재의 임계전류는 선재에 입사되는 자기장의 세기에 비례하여 감소하는 임계전류-자기장(I_c-B) 특성을 갖는다. 특히 수직으로 입사하는 자기장에 대하여 REBCO 선재의 임계전류 감소는 최대가 되므로, 두 종류의 마그넷에 입사되는 수직 자기장 (B_{\perp})을 해석하였다.

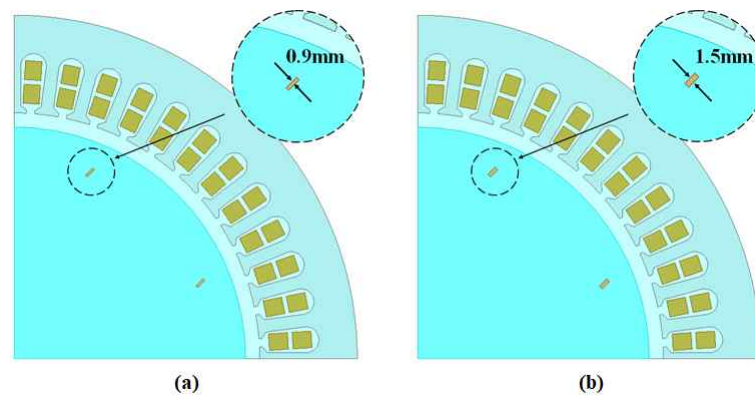


Fig. 5 Two-dimensional model of two HTS magnets
(a) NI magnet (b) MI magnet

Fig. 6은 한 주기 동안에 무절연 마그넷에 입사되는 최대 수직 자기장을 나타낸다. 우선 사각 심볼 라인은 전기자로부터 발생하는 회전자계가 없는 상태에서 마그넷의 직류 운전전류 (I_f) 100 A를 통전하였을 때, 마그넷이 받는 최대 수직 자기장이다. 삼각 심볼 라인과 원형 심볼 라인은 각각 동기 상태와 비동기 상태를 나타내며, 두 해석의 공통된 해석조건은 무절연 마그넷의 운전전류가 직류 100 A이고, 무절연 마그넷은 전기적인 주파수 1 Hz에 해당하는 기계적인 회전속도 30 rpm으로 회전하는 상황이다. 이때, 동기 상태 해석결과는 전기자 운전전류 (I_a)의 크기가 교류 1 A_{rms}, 주파수 (f)가 1 Hz를 가질 때 전기자로부터 발생하는 회전자기장 환경에서 회전 중인 마그넷이 받는 최대 수직 자기장이며, 비동기 상태 해석결과는 전기자 운전전류 크기가 교류 1 A_{rms}, 주파수가 2 Hz를 가질 때 전기자로부터 발생하는 회전자기장 환경에서 회전 중인 마그넷이 받는 최대 수직 자기장이다.

회전자계가 없는 상태에서 자기장이 변동하는 요인은 마그넷의 직류 전류뿐이므로 해석 결과로부터 마그넷의 최대 수직 자기장은 일정하다. 전기자로부터 동기 상태의 회전자계를 인가하고 있으므로 마그넷에 인가된 수직 자기장은 약간의 리플을 포함한다. 마지막으로 회전자계와 마그넷의 회전속도가 1 Hz의 주파수 차이가 발생하는 비동기 상태에서는 다른 두 결과값 보다 최소값과 최대값의 편차가 큰 한 주기의 교류 파형을 갖는 수직 자기장이 마그넷에 입사된다. 특이 사항으로 회전자계가 없는 상태에서 수직 자기장보다 회전자계가 존재하는 동기 상태에서 수직 자기장이 더 크다.

Fig. 7은 금속절연 마그넷에 영향을 주는 한 주기 동안의 최대 수직 자기장을 나타내었다. 무절연 마그넷의 경우와 마찬가지로 금속절연 마그넷의 최대 수직 자기장은 동기 상태에서 가장 작고, 다음으로 회전자계가 없는 상태이며, 비동기 상태에서 가장 크다. 그리고 비동기 상태는 다른 두 경우보다 최소값과 최대값의 편차가 큰 한 주기의 교류 파형을 갖는 수직 자기장이 마그넷에 입사된 결과값을 나타낸다.

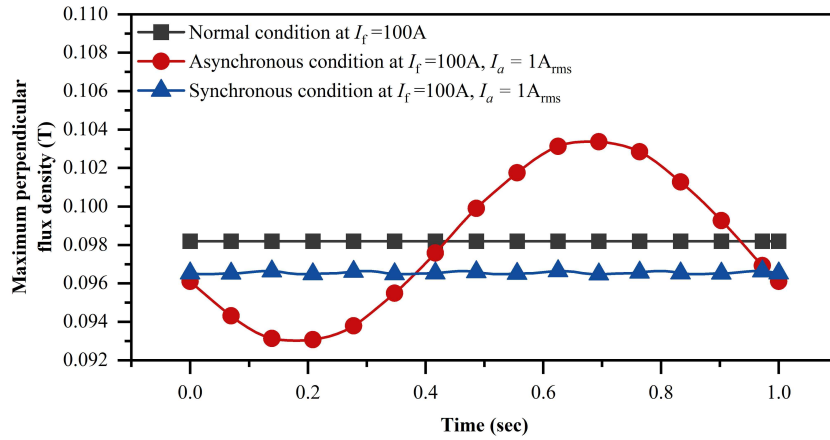


Fig. 6 Comparison of maximum perpendicular flux density of NI magnet, charged at $I_f = 100$ A, between the various field conditions.

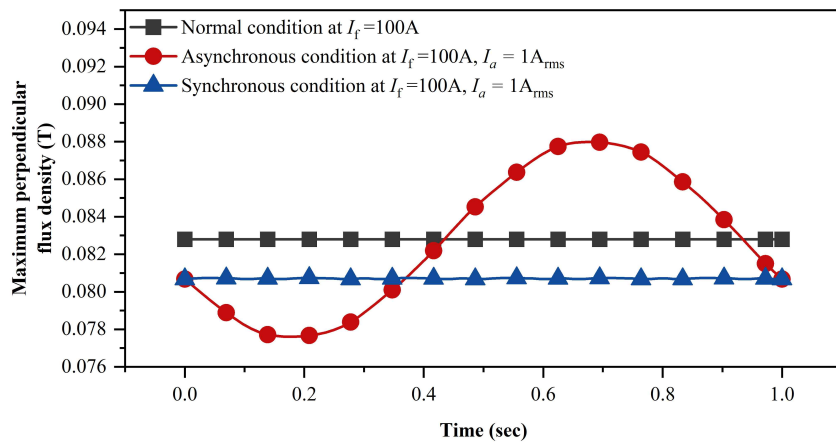


Fig. 7 Comparison of maximum perpendicular flux density of MI magnet, charged at $I_f = 100$ A, between the various field conditions.

Fig. 8과 Fig. 9는 비동기 상태와 동기 상태에서 전기자의 운전전류로 교류 1 A_{rms} , 2 A_{rms} 그리고 3 A_{rms} 를 인가할 때, 마그네틱의 운전전류를 직류 0 A 부터 200 A 까지 20 A 간격으로 해석한 결과이다.

빈 심볼과 짝찬 심볼의 결과값들은 각각 동기 상태와 비동기 상태를 나타낸다. 무절연과 금속절연 마그네틱 모두 비동기 상태가 동기 상태보다 최대 수직 자기장이 크다. Fig. 8과 Fig. 9에서 마그네틱의 운전전류가 직류 0 A 일 때, 전기자의 운전전류가 각각 교류 1 A_{rms} , 2 A_{rms} , 3 A_{rms} 에서 무절연 마그네틱의 최대 수직 자기장은 5.4 mT, 10.8 mT, 16.2 mT이고, 금속절연 마그네틱의 최대 수직 자기장은 5.4 mT, 10.9 mT, 16.3 mT이다.

2차원 유한요소해석 결과로부터 두 종류의 무절연계 고온초전도 마그네틱은 동기 상태 경우보다 비동기 상태에서 큰 수직 자기장의 영향을 받았다. 회전자계 영향이 없는 상태가 회전자계가 존재하는 동기 상태보다 고온초전도 마그네틱이 받는 수직 자기장이 더 크게 해석되었다. 동기 상태의 고온초전도 마그네틱이 받는 수직 자기장이 더 작은 이유는 전기자 권선의 회전자계가 동기화되어 회전하는 고온초전도 마그네틱의 중심 자기장에 영향을 주기 때문에 선재 면에 수직한 경로의 자기장이 감소한 것으로 추측된다.

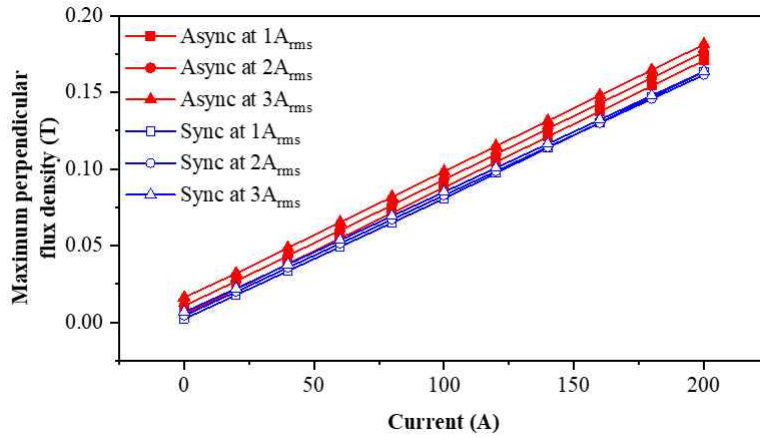


Fig. 8 Comparison of maximum perpendicular flux density of NI magnet according to current on the various field conditions

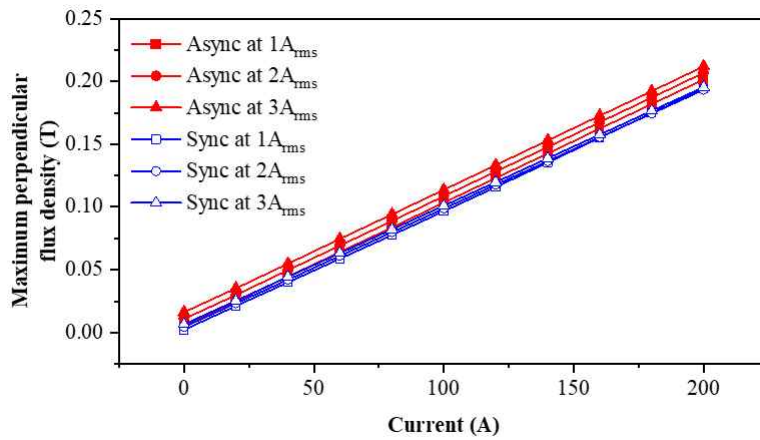


Fig. 9 Comparison of maximum perpendicular flux density of MI magnet according to current between synchronous and asynchronous condition

IV. 실험 결과 및 고찰

4.1. 고온초전도 마그넷의 비동기 회전자계에 대한 전자기 특성 평가 장치의 구성

Fig. 10과 Fig. 11은 각각 비동기 회전자계 환경에서 두 마그넷의 전자기 특성 평가 장치의 구성과 실험 사진을 보여준다. 액체 질소 냉매를 사용하는 고정된 냉각조 내부에는 고온초전도 마그넷이 위치한다. 냉각조는 비동기 회전자계를 발생하는 고정자 내부 중앙부에 동축으로 정렬되어 있다. 직류 전원장치를 사용하여 고온초전도 마그넷으로 직류 전류를 공급하고, 교류 전원장치를 사용하여 전기자에 3상 교류 전류를 인가하여 비동기 회전자계를 발생하게 된다.

데이터 수집 장치와 컴퓨터 사이의 통신을 통해 두 마그넷의 신호를 측정하고 수집하였다. 신호 측정에 사용된 데이터 수집 장치는 National Instrument사의 SCXI-1000 모델을 사용하였다. 수집하는 신호는 직류 전원장치에서 공급되는 직류 전류, 교류 전원장치에서 공급되는 교류 전류, 그리고 마그넷의 전체전압과 중심 자기장이다. 50 mV 대 200 A 저항 비를 갖는 셉트 저항을 사용하여 마그넷의 통전전류를 전압 신호로 측정하였다. 고정자의 3상 전기자 권선에 인가되는 교류 전류는 HIOKI사의 AC/DC 비접촉 전류 센서인 CT7636 모델을 사용하여 교류전류 순시치 1 A당 1 mV의 전압신호로 변환하여 측정하였다. 테스트 마그넷의 전압을 측정하기 위하여 마그넷 양단에 구리 시트로 전압탭을 제작하였다. 77 K 온도에서도 동작되는 Lakeshore사의 HGCT-3020 Transverse Type의 홀센서를 사용하여 마그넷의 중심 자기장을 측정하였다.

SCXI-1000 DAQ 장치에 1325 모델의 아날로그 출력 보드를 장착하여 0~10 V의 범위의 전압 신호를 이용하여 직류 전원장치의 출력 전류를 제어하였다. 교류 전원장치를 제어하기 위해서 장치 제조사에서 제공하는 소프트웨어를 사용하여 전기자에 인가되는 3상 교류 전류의 크기와 주파수를 조절하였으며, 전원의 투입과 차단은 전자접촉기를 사용하였다. 전자 접촉기와 Arduino 릴레이 모듈을 사용하여 자기 유지 회로를 구성하였으며, 1325 아날로그 출력 보드로 Arduino 릴레이 모듈의 스위칭 동작을 제어하여 교류 전원장치에서 전기자 권선으로 인가되는 3상 교류전류의 투입과 차단 동작을 제어하도록 회로를 구성하였다.

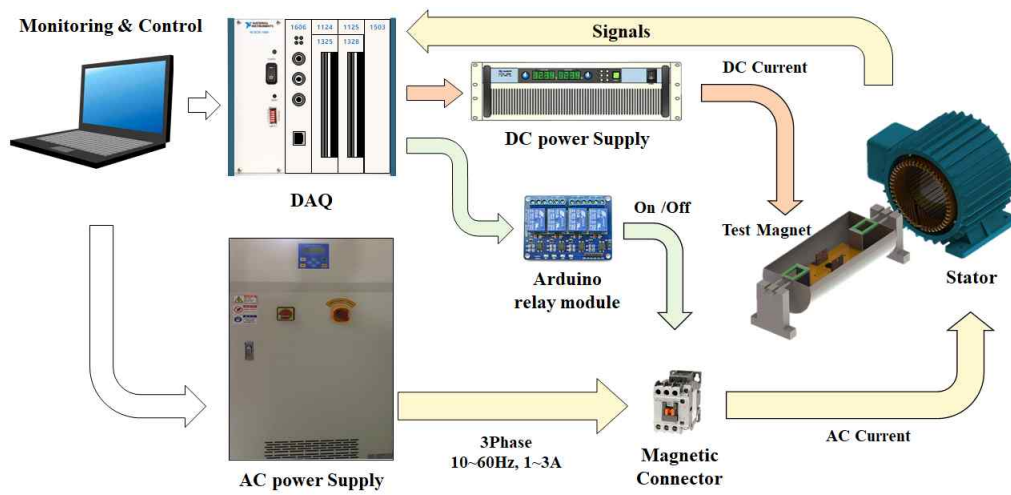


Fig. 10 Scheme of experiment setup

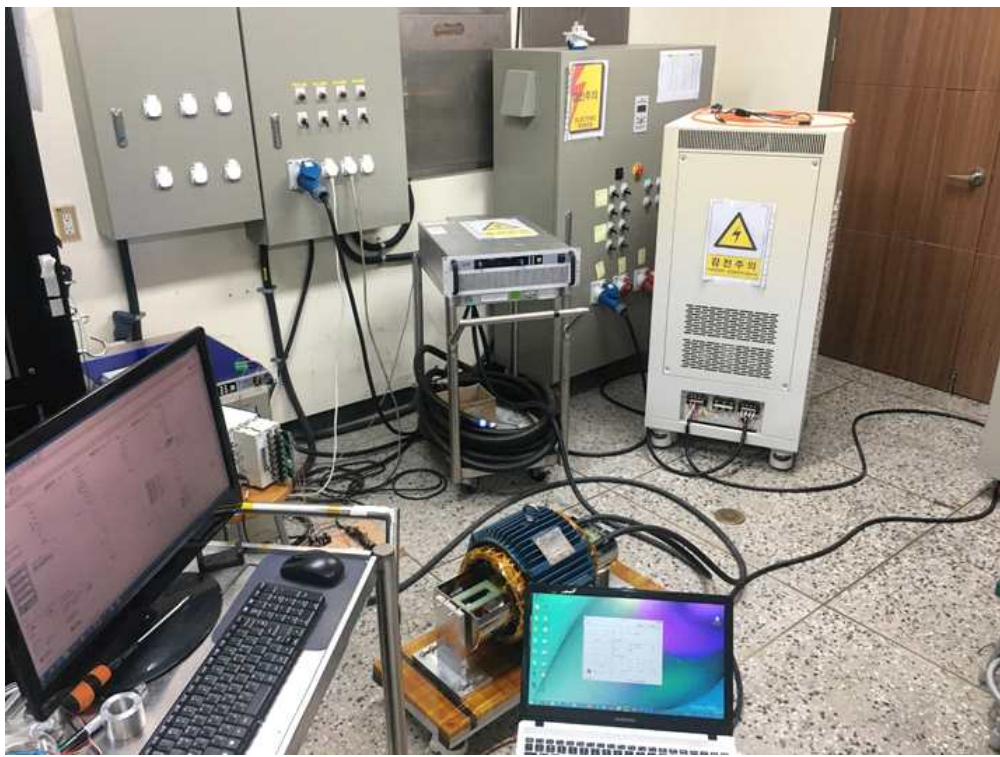


Fig. 11 Photograph of experiment setup

4.2. 임계전류 측정실험과 순간 방전 실험의 결과 및 고찰

비동기 회전자계를 인가하기 전·후의 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷의 임계전류와 n-value의 변화를 통해 안정도의 변화를 확인하기 위하여 비동기 회전자계가 없는 환경에서 임계전류 측정실험을 수행하였다. Fig. 12와 Fig. 13은 각각 무절연과 금속절연 마그넷의 임계전류 측정 결과를 보여준다. 비동기 회전자계가 인가되지 않은 상태에서 임계전류는 무절연과 금속절연 마그넷 각각 186.8 A, 171 A이며, n-value는 각각 24.493, 46.112이다. 특이사항으로 무절연과 금속절연 마그넷의 인덕턴스는 각각 22 μH , 12.6 μH 로 동일한 턴 수로 제작하였음에도 불구하고 차이가 발생하였다.

두 고온초전도 마그넷의 접촉저항을 측정하기 위해서 비동기 회전자계가 인가되지 않은 상태에서 순간 방전 실험을 수행하였다. Fig. 14와 15은 두 마그넷의 순간 방전 실험 결과이다. Fig. 16과 Fig. 17은 각각 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷에의 중심 자기장의 자연방전 결과를 나타낸 것이다. Fig. 16과 Fig. 17에서 두 고온초전도 마그넷의 중심 자기장 값은 0과 1 사이로 정규화된 값으로 나타내었다. 순간 방전 실험 결과로부터 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷의 시정수는 각각 12.126 sec, 19 msec로 측정되었다. 무절연 마그넷이 금속절연 마그넷에 비하여 긴 시정수를 가지며, 식 (9)를 사용하여 계산한 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷의 접촉저항은 각각 1.81 $\mu\Omega$, 663.15 $\mu\Omega$ 이다. 무절연 마그넷의 접촉저항이 금속절연 마그넷의 접촉저항보다 약 366배 작게 측정되었다.

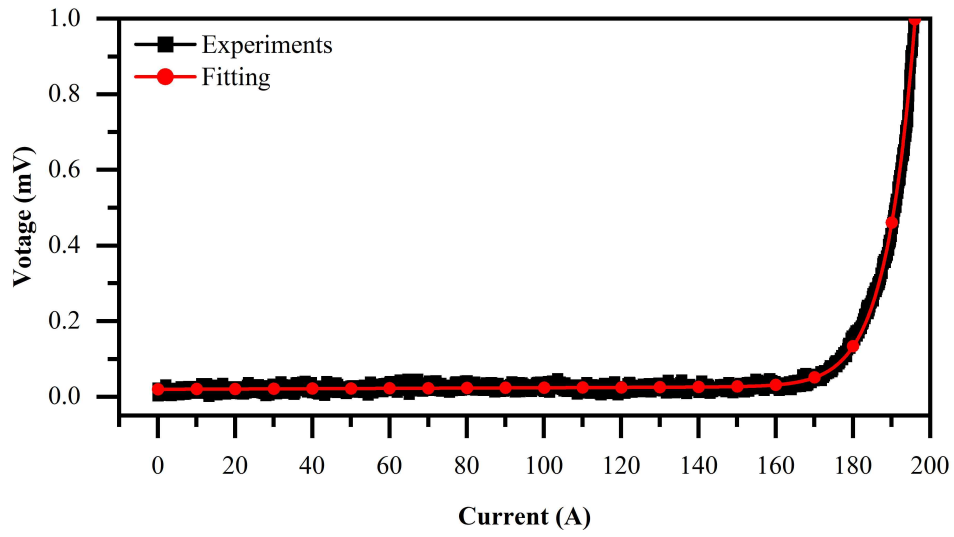


Fig. 12 I-V experiment curve of NI magnet

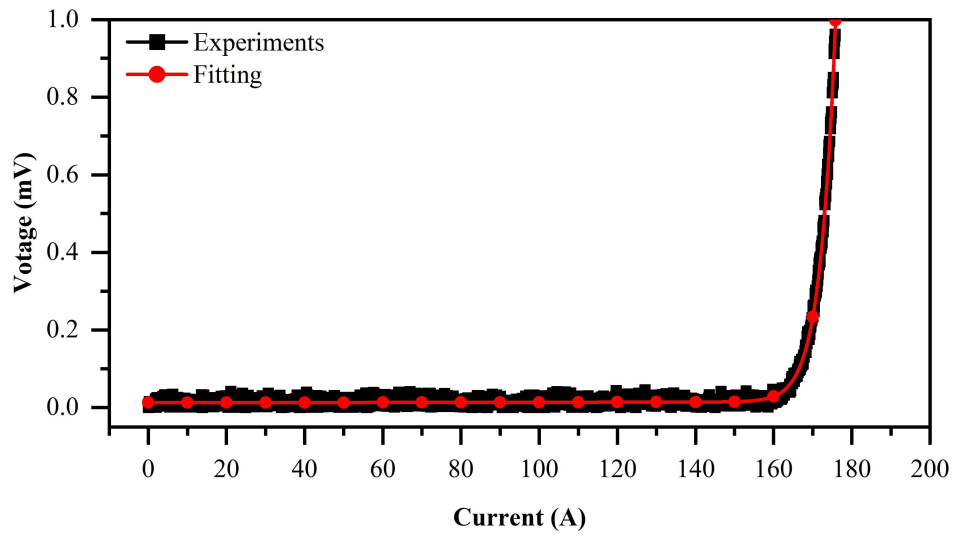


Fig. 13 I-V experiment curve of MI magnet

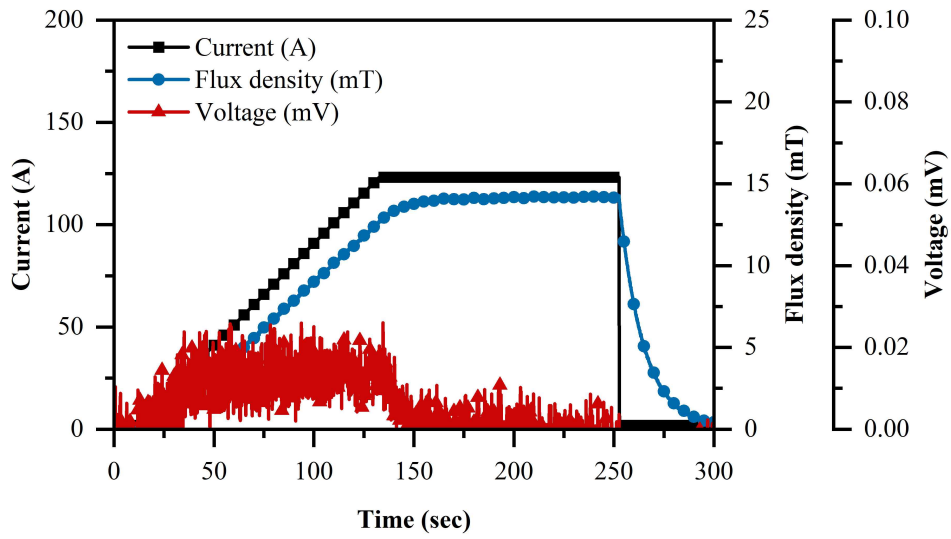


Fig. 14 Experiment results on sudden discharge test of NI magnet

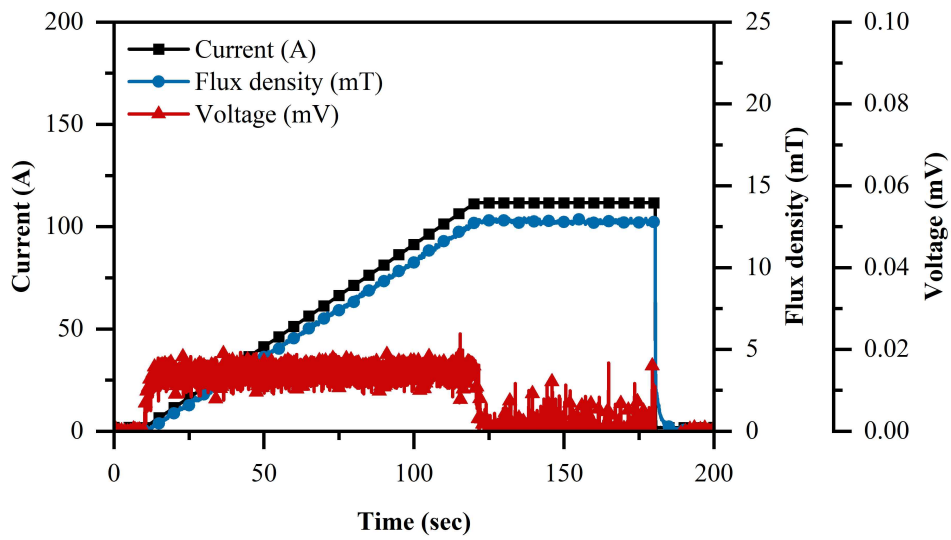


Fig. 15 Experiment results on sudden discharge test of MI magnet

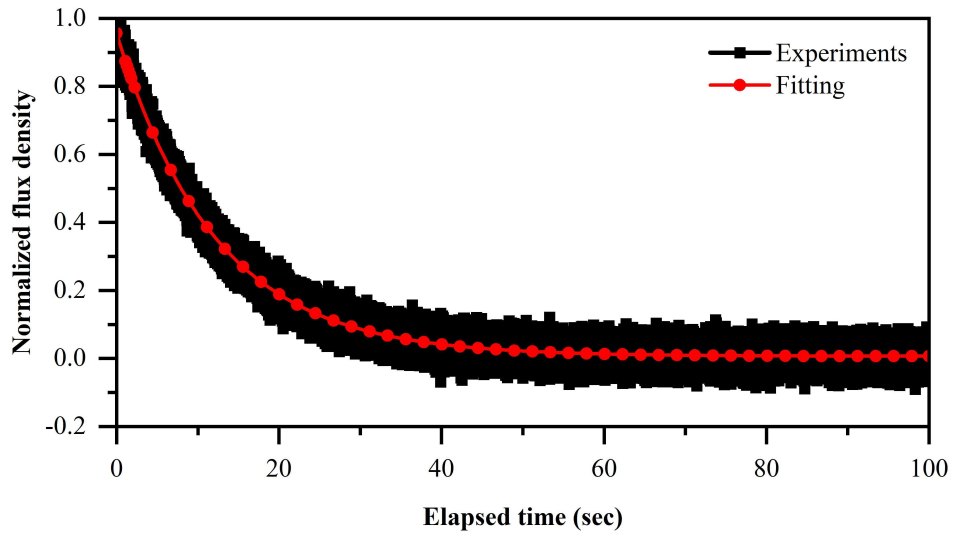


Fig. 16 Normalized central flux density versus elapsed time curve for NI magnet

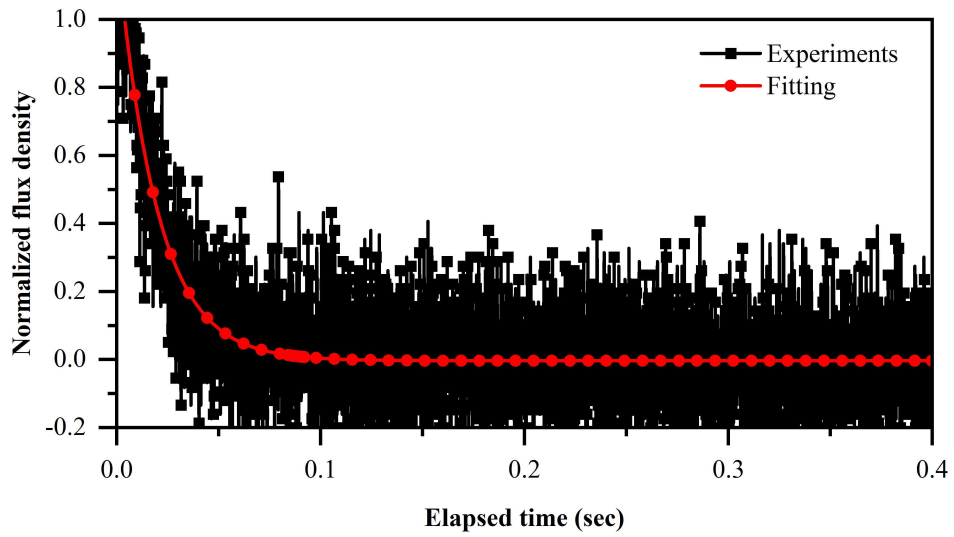


Fig. 17 Normalized central flux density versus elapsed time curve for MI magnet

Table 5는 비동기 회전자계를 인가하지 않은 상태에서 수행된 임계전류 실험과 순간 방전 실험으로부터 도출한 등가회로 파라미터를 요약하여 나타낸 것이다. 동일한 턴 수로 제작된 두 종류의 고온초전도 마그넷의 인덕턴스가 상이한 이유는 측정 장치의 분해능에 의한 오차로 추정된다. 데이터 수집 장치에서 측정되는 두 마그넷의 전압 신호 범위가 ± 500 mV이고 측정 장치의 분해능이 16 bit이기 때문에 측정되는 전압 신호의 최소 단위는 $1000 \text{ mV} / 2^{16}$ 결과로부터 $15.258 \mu\text{V}$ 가 된다.

두 마그넷의 접합저항이 상이한 이유는 금속절연 마그넷에서 턴 간에 STS 테이프의 사용으로 접촉저항이 상대적으로 커졌기 때문이다. 선행 연구 사례로부터 무절연계 권선기술을 적용한 소형 마그넷의 접촉저항은 수십에서 수백 $\mu\Omega$ 범위이다 [13] [14]. 본 특성 실험에서 측정된 무절연 마그넷의 접촉저항은 유사 연구의 선행 사례보다 작은 값을 가지고 있으며, STS 테이프를 사용한 금속절연 마그넷의 경우 선행 연구 사례와 유사한 범위 내의 값을 갖는다.

Table 5. Parameters of two HTS magnets

Parameter	NI	MI
Critical current at 77K, self-field (A)	186.8	171
N-value	23.493	46.112
Time constant (sec)	12.126	0.019
Inductive voltage (μV)	21.8	12.6
Slope (A/s)	0.989	0.998
Inductance (μH)	22.0	12.6
Contact resistance ($\mu\Omega$)	1.81	663.15

4.3. 비동기 회전자계에서 임계전류 측정실험 결과와 고찰

4.3.1. 임계전류와 n-value 측정 결과

고정자의 전기자 권선에 인가하는 운전전류의 크기는 $1 A_{rms}$, $2 A_{rms}$, $3 A_{rms}$ 이고 주파수는 10 Hz, 35 Hz, 60 Hz로 실험은 전류와 주파수를 조합한 총 9가지 (3×3)로 수행하였다. 비동기 회전자계 인가실험에서 마그넷의 임계전류 측정실험을 2회 반복하였다. 비동기 회전자계를 인가한 두 고온초전도 마그넷으로부터 측정된 전압 신호를 이동 평균 필터를 사용하여 직류 성분을 추출한 후 임계전류와 n-value를 분석하였다.

Fig. 18과 Fig. 19는 비동기 회전자계를 인가한 상태에서 측정한 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷의 임계전류의 color map이고, Fig. 20과 Fig. 21은 n-value의 color map이다. Fig. 18, 19, 20 그리고 Fig. 21의 결과는 2회 반복한 측정 결과의 평균값을 사용하여 작성하였다. 각각의 그래프에서 X축은 전기자 권선에 인가되는 교류 운전전류의 주파수이며, Y축은 전기자 권선에 운전전류 $1 A_{rms}$, $2 A_{rms}$, 그리고 $3 A_{rms}$ 인가 시 두 고온초전도 마그넷이 받는 최대 수직 자기장이다.

Fig. 18과 Fig. 19에서 두 고온초전도 마그넷의 임계전류는 비동기 회전자계의 세기가 증가할수록 감소하였다. 비동기 회전자계를 인가한 모든 실험 조합에서 두 고온초전도 마그넷의 임계전류는 비동기 회전자계가 없을 때 측정한 임계전류(무절연 마그넷: 186.8 A, 금속절연 마그넷: 171 A)보다 작다.

Fig. 20과 Fig. 21에서 두 고온초전도 마그넷의 n-value는 비동기 회전자계의 세기와 주파수가 증가할수록 감소하였다. 그리고 Table 6과 7로부터 비동기 회전자계를 인가한 모든 실험 조합에서 두 고온초전도 마그넷의 n-value는 비동기 회전자계가 없을 때 측정한 n-value(무절연 마그넷: 24.493, 금속절연 마그넷: 46.112)보다 작다.

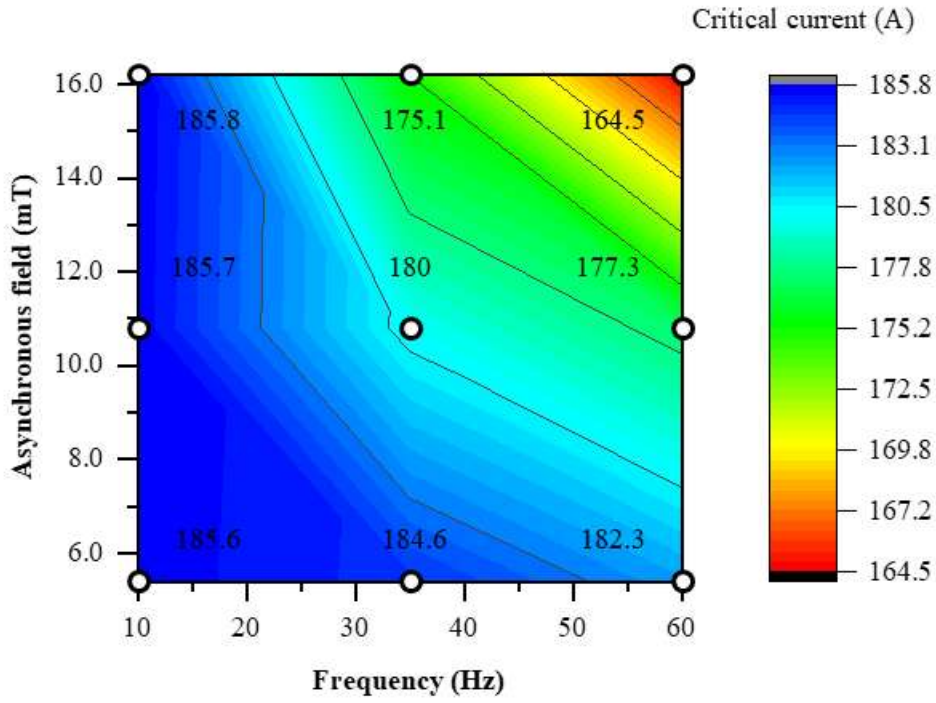


Fig. 18 Critical current color map for NI magnet

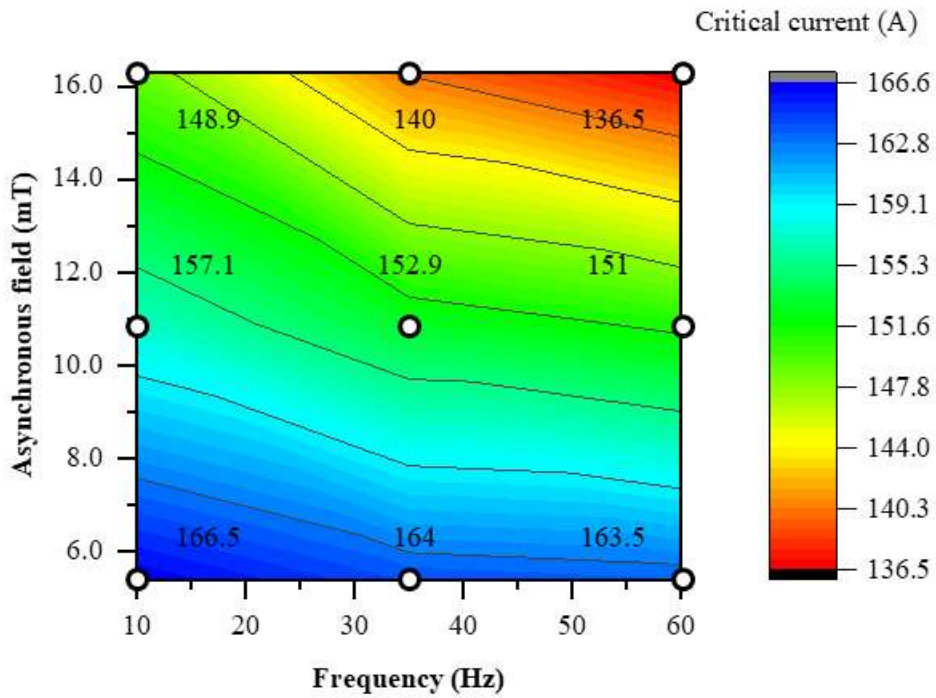


Fig. 19 Critical current color map for MI magnet

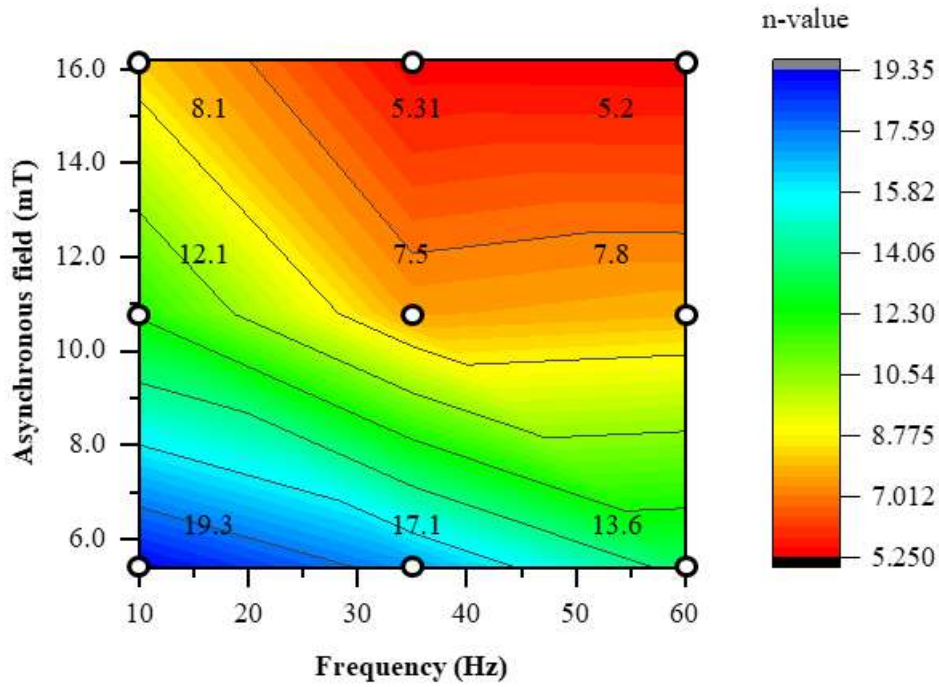


Fig. 20 N-value color map for NI magnet

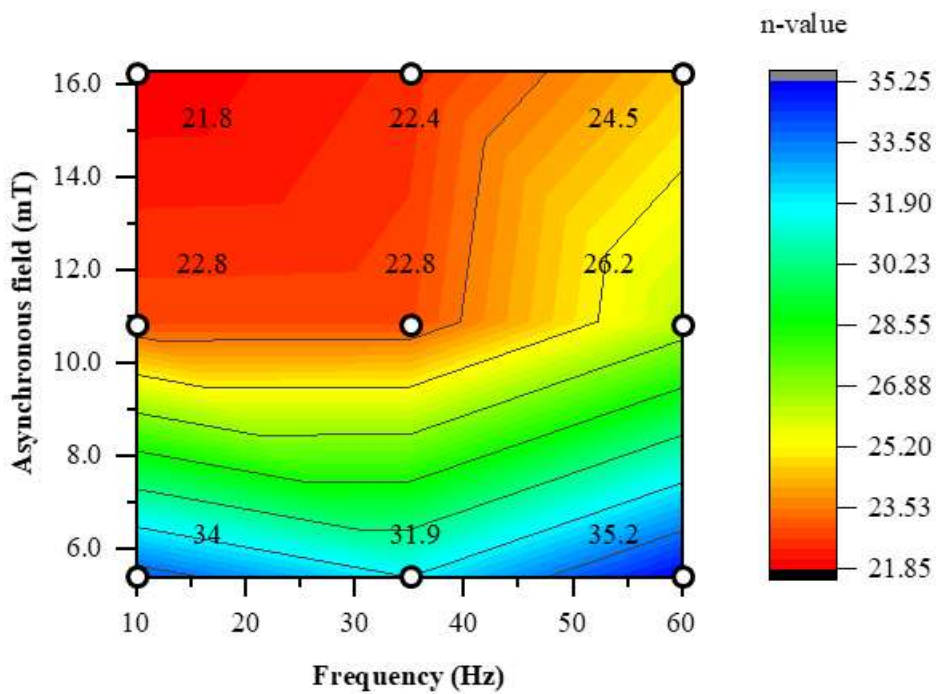


Fig. 21 N-value color map for MI magnet

Table 6과 Table 7은 각각 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷의 비동기 회전자계가 없을 때 측정된 임계전류(I_{c0}) 대비 비동기 회전자계가 인가된 상태에서 측정된 임계전류(I_{c1})의 감소율과 비동기 회전자계가 없을 때 측정된 n-value(n_0) 대비 비동기 회전자계가 인가된 상태에서 측정된 n-value(n_1)의 감소율을 동시에 나타낸 표이다.

Table 6에서 무절연 마그넷의 비동기 회전자계에 의한 임계전류 감소율은 비동기 회전자계 16.2 mT, 60 Hz에서 최대 11.94%이고, 무절연 마그넷의 비동기 회전자계에 의한 n-value 감소율은 비동기 회전자계 16.2 mT, 60 Hz에서 최대 77.87%이다.

Table 7에서 금속절연 마그넷의 비동기 회전자계에 의한 임계전류 감소율은 비동기 회전자계 16.2 mT의 60 Hz에서 최대 20.18%이고, 금속절연 마그넷의 비동기 회전자계에 의한 n-value 감소율은 비동기 회전자계 5.4 mT의 10 Hz에서 최대 46.87%이다.

실험 결과를 정리하면 비동기 회전자계 인가 전과 후의 임계전류의 감소율은 금속절연 마그넷에서 더 크며, 비동기 회전자계 인가 전과 후의 n-value의 감소율은 무절연 마그넷이 금속절연 마그넷보다 더 크다. 특이사항으로 무절연 마그넷은 주파수가 가장 낮은 10 Hz에서 임계전류의 변화가 작고, 금속절연 마그넷의 n-value는 주파수가 가장 낮은 10 Hz에서 n-value가 가장 크게 감소한다.

Table 6. Degradation rate of critical current and n-value for NI magnet by various asynchronous rotating magnetic field

Asynchronous field (mT)	$ (I_{c1}/I_{c0}) - 1 $ (%)			$ (n_1/n_0) - 1 $ (%)		
	10 Hz	35 Hz	60 Hz	10 Hz	35 Hz	60 Hz
5.4	0.64	1.18	2.41	17.85	27.21	42.11
10.8	0.59	3.64	5.09	48.5	68.08	66.8
16.2	0.54	6.26	11.94	65.52	77.40	77.87

Table 7. Degradation rate of critical current and n-value for MI magnet by various asynchronous rotating magnetic field

Asynchronous field (mT)	(I_{c1}/I_{c0}) - 1 (%)			(n_1/n_0) - 1 (%)		
	10 Hz	35 Hz	60 Hz	10 Hz	35 Hz	60 Hz
5.4	2.63	4.09	4.39	26.27	30.82	23.66
10.9	8.13	10.58	11.7	50.56	50.56	43.18
16.3	12.92	18.13	20.18	52.72	51.42	46.87

4.3.2. 전압 측정 결과

비동기 회전자계에 따른 임계전류와 n-value의 감소가 두 고온초전도 마그넷의 단자 전압에 미치는 영향을 확인하였다. Fig. 22과 Fig. 23은 두 고온초전도 마그넷의 전류-전압(I-V) 곡선이다. X축은 고온초전도 마그넷의 직류 운전전류이며, Y축은 고온초전도 마그넷의 단자 전압이다. I-V 곡선에서 임계전류는 임계전압 283.9 μ V에 도달하는 고온초전도 마그넷의 운전전류이고, I-V 곡선의 기울기는 n-value에 대응하며 기울기가 완만한 대신 임계전류 아래의 운전전류에서 단자 전압 상승이 큰 경우 작은 n-value를 갖는다.

Fig. 22에서 무절연 마그넷은 비동기 회전자계의 주파수와 세기가 증가할수록 곡선의 기울기가 완만한 대신 임계전류 아래의 운전전류에서 전압상승이 커진다. 즉, 비동기 회전자계의 주파수와 세기가 증가할수록 n-value가 감소함을 의미한다. 반면, Fig. 23에서 금속절연 마그넷은 비동기 회전자계의 주파수와 세기가 증가할수록 n-value가 감소하였음에도 불구하고 곡선 간의 기울기 차이가 구별되지 않는다.

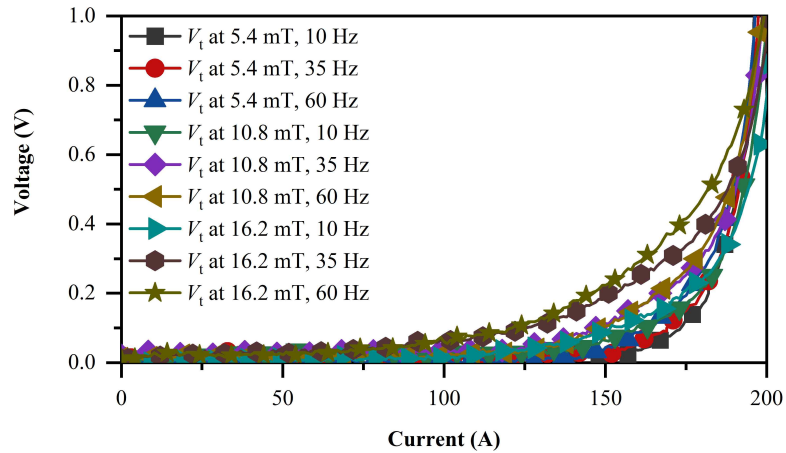


Fig. 22 I-V curve for NI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field

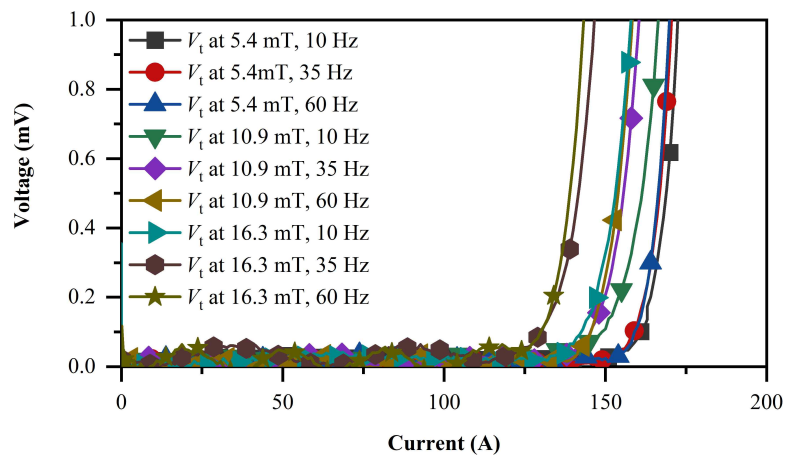


Fig. 23 I-V curve for MI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field

I-V 곡선의 면적은 전압과 전류의 곱으로 고온초전도 마그넷의 발열을 의미한다. 고온초전도 마그넷의 n-value가 작을수록 임계전류 아래의 운전전류에서 발열이 증가한다. Fig. 24와 Fig. 25은 두 테스트 마그넷의 전압이 임계전압에 도달할 때까지 시간에 따른 누적 발열량(Q)을 나타낸 것이다. Fig. 24에서 무절연 마그넷은 임계전압에 도달할 때까지, 비동기 회전자계 16.2 mT, 35 Hz에서 최대 1.2 J의 누적 발열량이 발생하였다. Fig. 25에서 금속절연 마그넷은 임계전압에 도달할 때까지 비동기 회전자계 10.9 mT, 10 Hz에서 최대 0.32 J의 누적 발열량이 발생하였다.

비동기 회전자계가 인가된 환경에서 무절연 마그넷이 금속절연 마그넷보다 n-value의 감소가 크기 때문에 임계전류보다 낮은 운전전류부터 전압이 상승하여 발열량이 많다. 반대로 금속절연 마그넷은 비동기 회전자계가 인가된 환경에서 n-value 감소가 작으므로 무절연 마그넷 대비 누적 발열량이 적다.

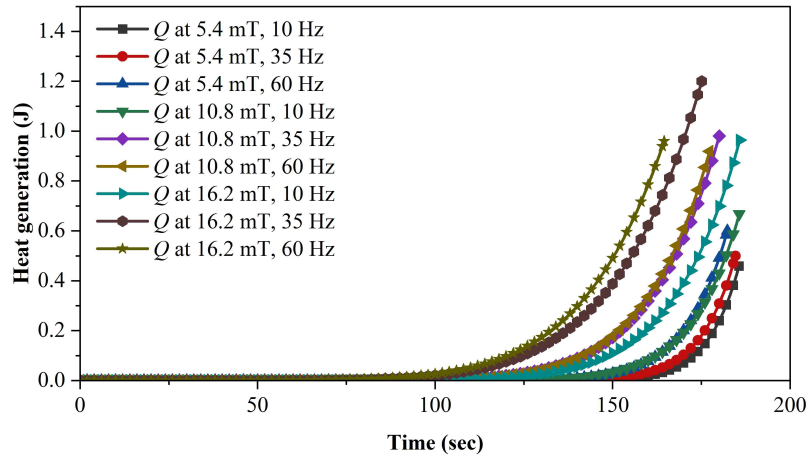


Fig. 24 Heat generation curves for NI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field

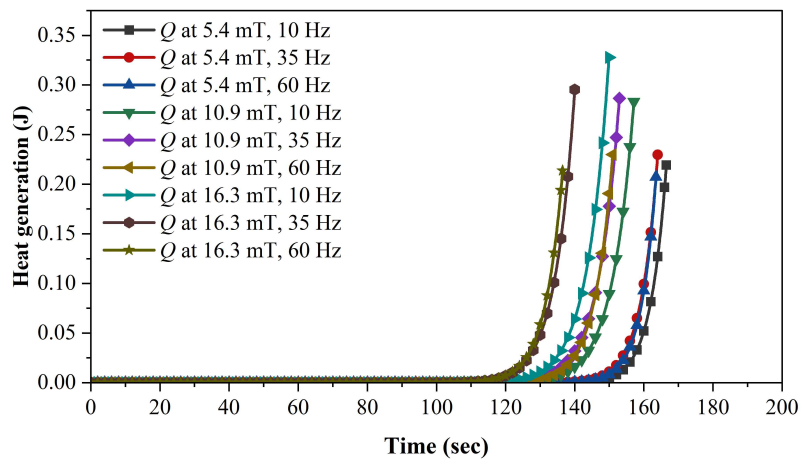


Fig. 25 Heat generation curves for MI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field

4.3.3. 중심 자기장 측정 결과

비동기 회전자계 인가에 따른 임계전류와 n-value의 감소가 두 고온초전도 마그넷의 중심 자기장에 미치는 영향을 확인하였다. Fig. 26과 Fig. 27은 두 고온초전도 마그넷의 단자 전압과 중심 자기장 측정 결과이다.

Fig. 26에서 무절연 마그넷은 10 Hz의 비동기 회전자계가 인가된 실험결과에서 비동기 회전자계의 세기가 5.4 mT 일 때 중심 자기장이 가장 늦게 포화가 되면서 가장 큰 중심 자기장 15.9 mT를 발생하고, 가장 큰 n-value 19.3을 갖는다. 비동기 회전자계의 세기가 16.2 mT 일 때 가장 빠르게 중심 자기장이 포화하면서 가장 작은 중심 자기장 11.9 mT를 발생하고, 동시에 가장 작은 n-value 값인 8.1을 갖는다.

35 Hz의 비동기 회전자계가 인가된 실험 결과에서 비동기 회전자계의 세기가 5.4 mT 일 때 중심 자기장이 가장 늦게 포화가 되면서 가장 큰 중심 자기장 16.3 mT를 발생하고, 가장 큰 n-value 17.1을 갖는다. 비동기 회전자계의 세기가 16.2 mT 일 때 가장 빠르게 중심 자기장이 포화하면서 가장 작은 중심 자기장 13.8 mT를 발생하고, 가장 작은 n-value 5.31를 갖는다.

60 Hz의 비동기 회전자계가 인가된 실험 결과에서 비동기 회전자계의 세기가 5.4 mT일 때 중심 자기장이 가장 늦게 포화가 되면서 가장 큰 중심 자기장 15.7 mT를 발생하고, 가장 큰 n-value 13.6을 갖는다. 비동기 회전자계의 세기가 16.2 mT일 때 가장 빠르게 중심 자기장이 포화하면서 가장 작은 중심 자기장 10.6 mT를 발생하고, 가장 작은 n-value 5.2를 갖는다.

무절연 마그넷은 모든 주파수 조건에서 비동기 회전자계의 세기가 커질수록 중심 자기장이 빠르게 포화되면서 최대 중심 자기장과 n-value가 작아진다. 즉, 비동기 회전자계의 세기가 커질수록 무절연 마그넷의 임계전류와 n-value가 감소하여 비선형적인 중심 자기장 특성이 현저히 나타났다.

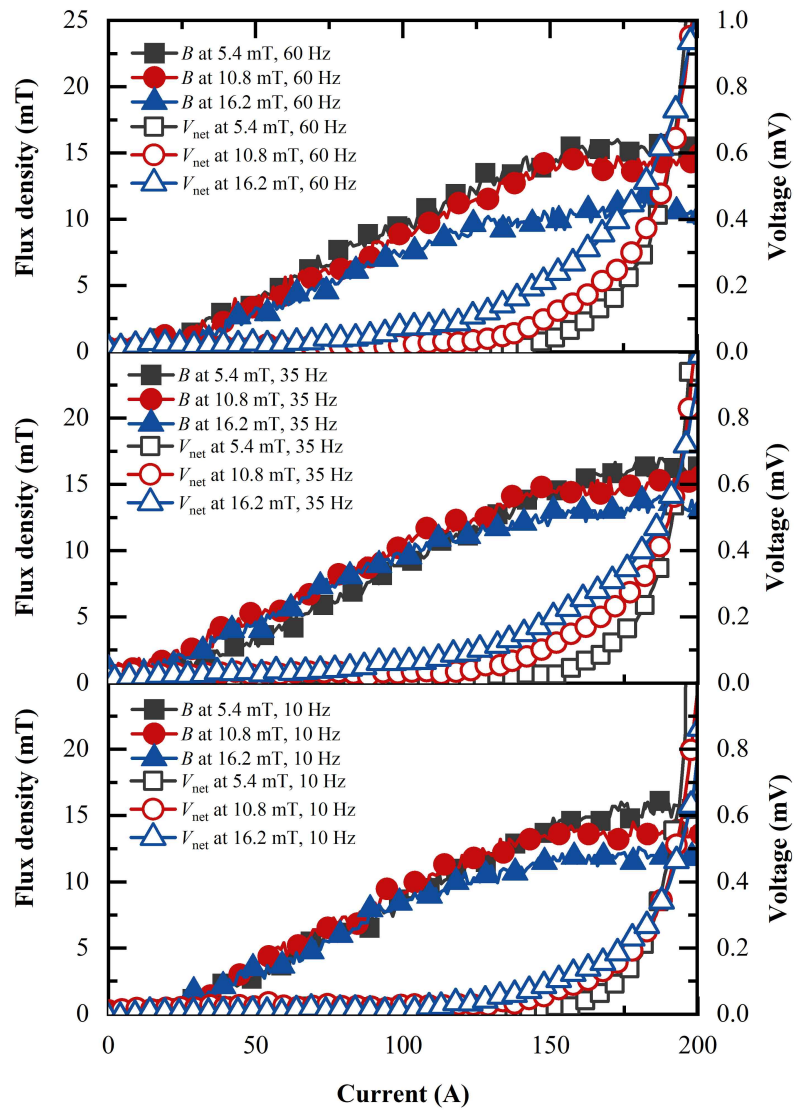


Fig. 26 I-B and V curve for NI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field

Fig. 27에서 금속절연 마그넷은 비동기 회전자계의 세기가 클수록 임계전류가 감소하여 운전전류가 제한되므로 최대 중심 자기장이 감소한다. 하지만 임계전류와 n-value의 감소에 따른 중심 자기장의 포화 특성이 없다.

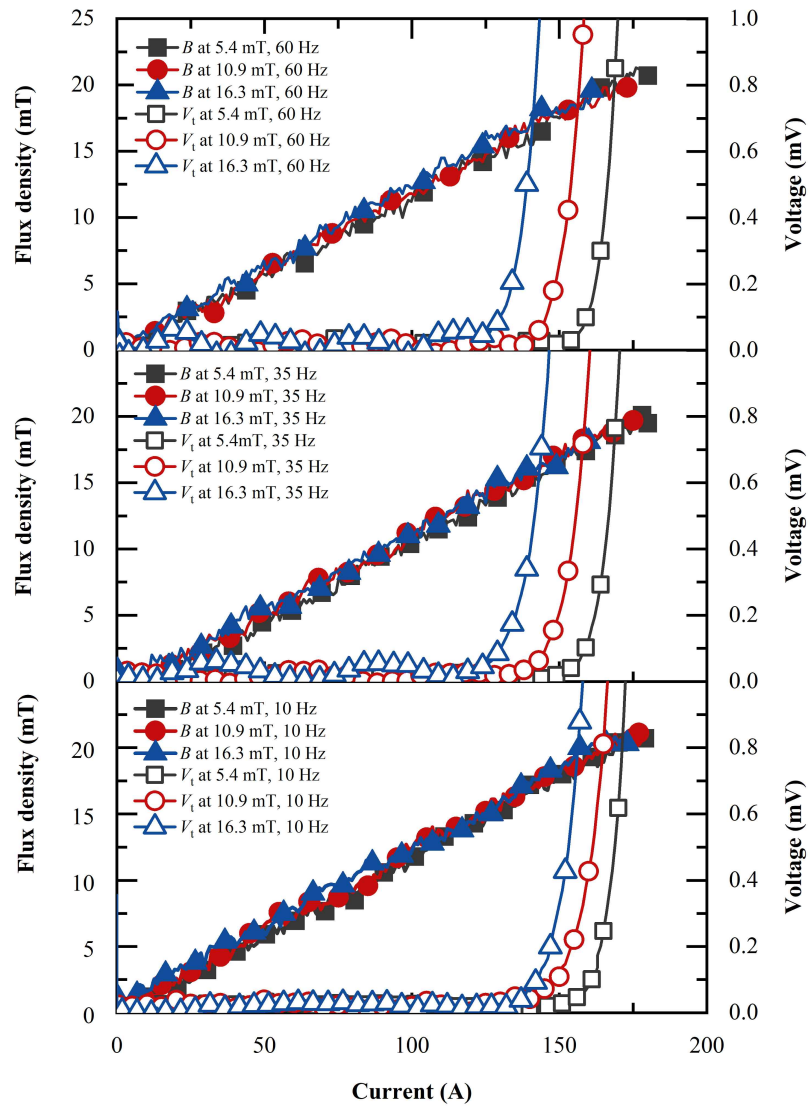


Fig. 27 I-B and V curve for MI magnet according to various asynchronous rotating magnetic field

4.3.4. 비동기 회전자계에서 임계전류 측정실험의 고찰

초전도 회전기의 기동 시, 또는 부하변동 시에 비동기 회전자계가 발생하기 때문에 고온초전도 마그넷의 안정도가 낮아질 것으로 예상하였다. 비동기 회전자계의 세기가 증가할수록 고온초전도 마그넷의 임계전류와 n -value가 낮아지는 실험결과로부터 비동기 회전자계가 고온초전도 마그넷의 안정도 감소에 큰 영향을 준다는 가설을 실험적으로 검증하였다. 향후 출력변동이 큰 초전도 회전기에 고온초전도 마그넷을 적용하기 위해서는 비동기 회전자계의 세기와 주파수 변화에 대한 고온초전도 마그넷의 안정도 평가가 필요할 것으로 판단된다.

특이사항으로 무절연 마그넷은 주파수가 가장 낮은 10 Hz에서 임계전류의 변화가 작고, 금속절연 마그넷의 n -value는 주파수가 가장 낮은 10 Hz에서 n -value가 가장 크게 감소하였다. 이와 같이 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷이 전압과 자기장에서 전자기 특성 차이를 보이는 이유는 접촉저항의 차이로 예상된다.

무절연 마그넷이 금속절연 마그넷보다 접촉저항이 작기 때문에 무절연 마그넷에서 국부적인 퀘치가 발생하면 턴 간으로 전류가 우회하기 쉽다. 그러므로 무절연 마그넷의 경우 비동기 회전자계의 세기와 주파수가 증가할수록 임계전류와 n -value가 감소하여 국부적인 퀘치가 일찍 발생하여도, 퀘치 영역의 발열을 분산시키고 고온초전도 마그넷의 전압상승을 억제하기 때문에 임계전류의 감소가 작은 것으로 추정된다.

Fig. 26으로부터 비동기 회전자계가 인가된 상황에서 무절연 마그넷은 임계전류 아래에서 턴 간 전류 분기가 일찍 발생하여 중심 자기장이 포화 특성을 갖는 것을 알 수 있다. 이러한 전자기 특성을 갖는 무절연 권선기술을 풍력발전기의 계자 권선에 적용하기 위해서는 설계 단계부터 비동기 회전자계에 의한 임계전류와 n -value 감소를 고려한 후 접촉저항에 따른 비선형적인 자기장 해석을 수행하여 기자력 산정이 필요할 것으로 생각된다.

금속절연 마그넷인 경우 10Hz 주파수의 비동기 회전자계 인가 시에 n -value가 작은 이유는 본 논문의 결과에서는 알 수 없으며, 향후 추가적인 연구를 통해 확인이 필요한 부분이다.

4. 4. 충전된 고온초전도 마그넷에 비동기 회전자계 인가 실험 결과 및 고찰

4. 4.1. 충전된 고온초전도 마그넷에 비동기 회전자계 인가 실험 결과

고온초전도 풍력발전기의 실제 운전상황을 고려한다면 동기 상태에서 정자계 분포를 갖는 고온초전도 마그넷은 부하 변동 시 비동기 회전자계의 영향을 받게 될 것이다. 이때, 비동기 회전자계에 의하여 안정도가 감소한 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷은 자기보호를 수행하고 고온초전도 마그넷을 보호할 것으로 예상된다.

Fig. 28과 Fig. 29는 각각 무절연 마그넷과 금속절연 마그넷에 초당 1 A의 충전율로 운전전류를 직류 100 A까지 충전하여 일정한 중심 자기장을 발생하고 있을 때, 선형적으로 증가하는 10 Hz의 비동기 회전자계를 인가한 상황에서 고온초전도 마그넷의 전압과 중심 자기장을 측정한 결과이다.

우선 Fig. 28과 Fig. 29에서 두 종류의 고온초전도 마그넷의 전압을 고찰하면, 전기자 교류 운전전류 8.8 A_{rms} 인가 시 무절연 마그넷의 양단전압은 임계전압 283.9 uV에 도달하였다. 그리고 전기자 교류 운전전류가 11.4 A_{rms}에 도달하였을 때 무절연 마그넷의 전압은 최대 0.936 mV까지 상승하였다. 전기자 교류 운전전류가 7.8 A_{rms}에서 금속절연 마그넷의 전압은 임계전압 283.9 uV에 도달하였고, 전기자 교류 운전전류가 11.4 A_{rms}에 도달하였을 때 금속절연 마그넷의 전압은 최대 8.67 mV까지 상승하였다. 최대 전압 상승은 무절연 마그넷이 금속절연 마그넷에 비하여 9.3배 낮다.

다음으로 Fig. 28과 Fig. 29에서 두 종류의 고온초전도 마그넷의 중심 자기장을 고찰하였다. Fig. 28에서 100 A의 직류 운전전류를 충전하였을 때 무절연 마그넷의 중심 자기장은 11.1 mT가 발생했다. 이때 10 Hz의 비동기 회전자계의 세기를 선형적으로 증가시켰을 때, 전기자 교류 운전전류 3.9 A_{rms}부터 자기장이 감소하기 시작하고 11.4 A_{rms}에서 중심 자기장은 0에 도달하였다. 자기장이 감소하기 시작하는 전기자 교류 운전전류는 임계전압에 도달하는 전기자 교류 운전전류 8.8 A_{rms} 대비 44.6 %이다. Fig. 29에서 100 A의 직류 운전전류를 충전하였을 때 금속절연 마그넷의 중심 자기장은 11.6 mT가 발생하였다. 금속절연 마그넷인 경우 전기자 교류 운전전류가 11.4 A_{rms}에 도달할 때까지 중심 자기장은 감소하지 않았다.

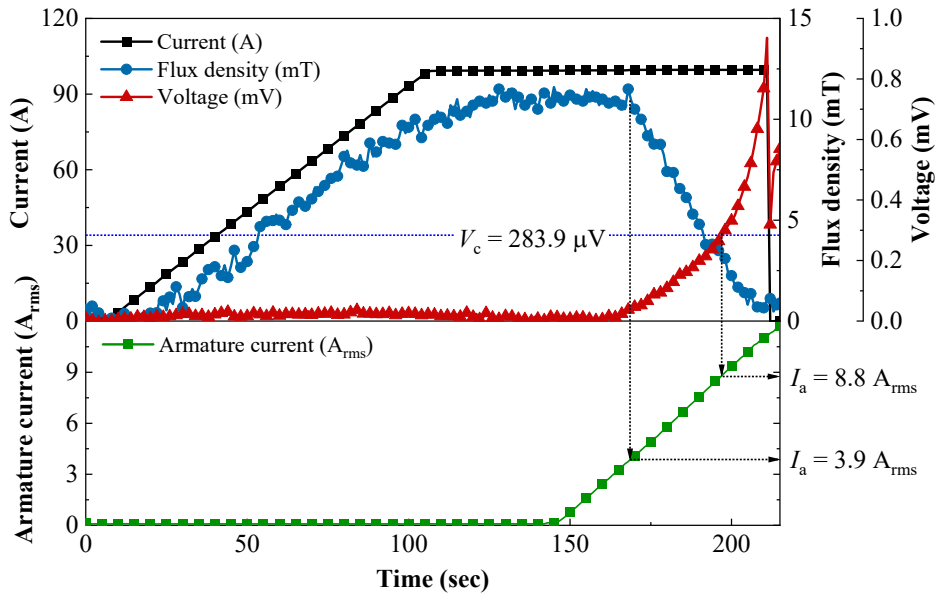


Fig. 28 Current, central magnetic field, terminal voltage results of NI magnet with $I_f = 100$ A applying the asynchronous rotating magnetic field with 10 Hz

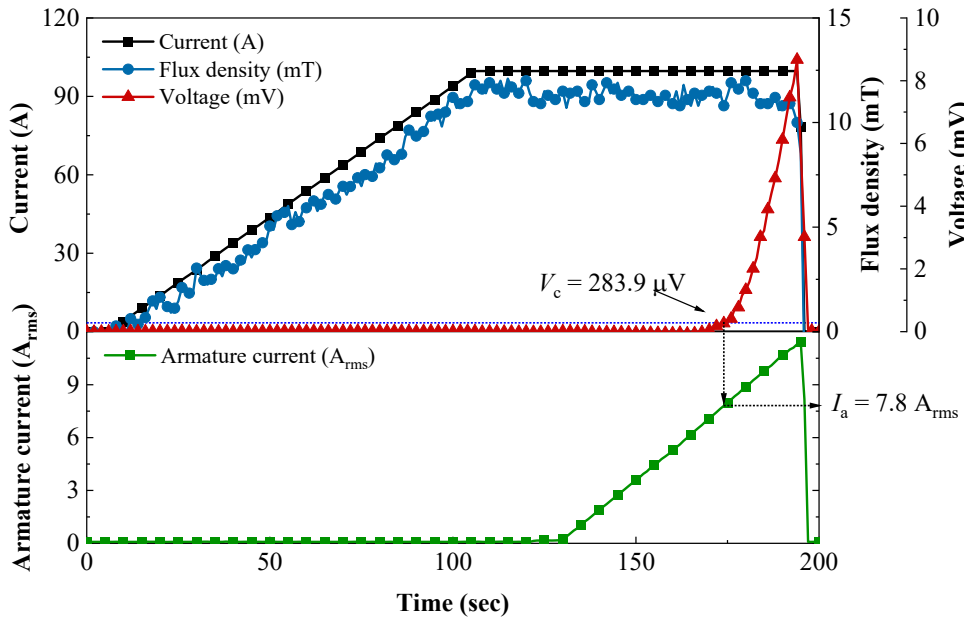


Fig. 29 Current, central magnetic field, terminal voltage results of MI magnet with $I_f = 100$ A applying the asynchronous rotating magnetic field with 10 Hz

4.4.2. 충전된 고온초전도 마그네티에 비동기 회전자계 인가 실험의 고찰

Fig. 28로부터 일정한 전류를 충전한 무절연 마그네티가 비동기 회전자계에 노출됐을 때, 무절연 마그네티는 턴 간 전류 우회 현상이 발생하여 전압상승을 억제하는 자기보호 특성을 보였다. 앞서 비동기 회전자계 인가 시 임계전류 측정 실험 결과와 다른 부분은 고온초전도 마그네티에 추가적인 전류 투입이 없는 부분이다. 그러므로 선형적으로 증가하는 비동기 회전자계를 인가할 때, 임계전류와 n-value의 감소로 인하여 고온초전도 선재의 전압상승이 발생하면서 턴 간으로 우회하는 전류가 커졌다. 이로 인해 마그네티 통전전류가 흐르는 고온초전도 선재의 턴 수가 감소하여 중심 자기장이 감소하고 고온초전도 선재의 전압 상승이 억제되었다. 즉, 작은 접촉저항을 갖는 무절연 마그네티의 경우 비동기 회전자계 환경에서 턴 간으로 전류가 우회하면서 고온초전도 마그네티를 보호하는 자기보호 특성을 보였다.

결과적으로 갑작스럽게 비동기 회전자계가 인가되는 고온초전도 풍력발전기의 계자 권선용 고온초전도 마그네티에 무절연 권선기술을 적용한다면 비동기 회전자계가 발생하는 순간에 고온초전도 마그네티를 영구손상으로부터 보호할 것으로 예상된다. 다만, 무절연 마그네티는 비동기 회전자계 영향에서 강건하지 못한 자기장 특성을 보인다. 이러한 특성을 개선하기 위해서는 접촉저항을 다소 높일 필요가 있다고 생각된다.

V. 결론

현재까지 무절연계 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷을 회전기에 적용하여 실증을 수행한 사례가 없었다. 동기기의 구조를 취하는 고온초전도 풍력발전기의 경우, 풍속 변동에 따라 출력이 변동하면 고정된 전기자로부터 회전 중인 고온초전도 마그넷으로 비동기 회전자계가 인가되어 고온초전도 마그넷의 영구손상을 유발할 수 있을 것으로 우려된다.

그러므로 본 연구에서는 풍력발전기의 운전환경 중 비동기 회전자계가 인가되는 상황에서 무절연 권선기술과 스테인리스 강 테이프를 사용한 금속절연 권선기술을 적용한 고온초전도 마그넷의 전자기 특성을 비교 분석 하였다.

이를 위해 실제 회전기용 고정자를 사용한 특성 평가 장치를 개발하고, 활용하여 고온초전도 마그넷에 비동기 회전자계를 인가 시에 임계전류 특성실험과 임계전류 미만으로 충전된 고온초전도 마그넷에 비동기 회전자계를 인가하는 여러 실험을 수행하였다.

본 연구를 통해 도출한 주요 결과는 아래와 같다.

1. 고온초전도 마그넷의 임계전류와 n-value가 비동기 회전자계의 세기가 증가할수록 감소하는 결과로부터 실제로 비동기 회전자계가 고온초전도 마그넷의 안정도를 감소시키는 것을 실험적으로 검증하였다.
2. 비동기 회전자계가 인가되는 상황에서 무절연계 권선기술이 적용된 고온초전도 마그넷이 턴 간 전류 우회를 통한 자기보호 특성을 갖는 것을 확인하였다.
3. 비동기 회전자계의 세기가 커질수록 무절연계 권선기술이 적용된 고온초전도 마그넷의 임계전류와 n-value가 감소하여 임계전류 아래의 운전전류에서 턴 간 우회 전류가 증가하여 중심 자기장이 감소하는 전자기 특성을 확인하였다.

본 연구의 결과로부터 비동기 상황에서 고온초전도 마그넷의 안정도가 감소하여도 작은 접촉저항을 갖는 무절연계 권선기술은 고온초전도 마그넷을 영구손상으로부터 보호할 수 있는

것으로 확인되었다. 그러므로 무절연계 권선기술은 풍력발전기의 계자 권선용 고온초전도 마그네틱의 안정도 향상에 기여가 클 것으로 예상된다. 다만, 무절연계 권선기술을 풍력발전기에 적용할 때, 고온초전도 마그네틱의 충·방전 지연 문제 외에도 비동기 회전자계 영향에서 접촉저항과 n -value 변화에 따른 중심 자기장이 감소하는 전자기 특성에 대한 검토가 반드시 필요할 것으로 판단된다. 그리고 무절연계 권선기술은 비동기 회전자계에서 임계전류 아래에서 초전도 회전기 시스템 운전에 적절한 자기장 특성을 갖기 위해서는 일정 수준의 접촉저항이 필요할 것으로 예상된다.

본 논문은 비동기 회전자계 인가 시 고온초전도 회전기 계자권선용 무절연계 고온초전도 마그네틱의 전자기 특성변화 검증을 목적으로 하였다. 그 결과 고온초전도 회전기용 무절연계 권선기술을 적용한 계자코일의 권선기술 방법 개발에 관한 연구가 더욱 확대되어야 한다는 것을 확인 하였다. 또한, 본 논문에서 모사한 비동기 회전자계는 10 Hz 이상의 주파수를 갖는다. 이는 실험에 사용된 교류 전원장치의 제한된 사양 때문에 생겨난 부분이다. 향후 연구에서는 전기자 권선에서 발생하는 회전자계로 10 Hz 이내의 주파수를 적용한 실험이 필요한 부분이며, 비동기 상황 이외에도 발전기 사고 고장과 같은 외란 조건에서 무절연계 마그네틱의 안정도와 전자기 특성의 검토가 수행된다면 회전기에서 무절연계 권선기술에 대한 신뢰성을 확보할 수 있다고 생각된다.

참고문헌

- [1] 김영춘, “초전도발전기/전동기 개발의 현재와 미래.” 전기의 세계, 59권, 10호, pp. 31-33, 2010.
- [2] 김호민, “풍력발전 국내외 현황 및 풍력용 초전도발전기 기술 전망,” 초전도와 저온공학, 15권, 1호, pp. 4-8, 2013.
- [3] Markus Bauerm Martin Keller, *at al.*, “HTS field coils with robust design for a superconducting wind turbine generator,” presented at 25th International Conference on Magnet Technology, Amsterdam, Netherlands, Aug. 2017.
- [4] S. Hahn, *at el.*, “HTS Pancake Coils Without Turn-to-Turn Insulation,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 21, no. 3, pp. 1592-1595, June. 2011.
- [5] Song, Jung-Bin *et al.*, “Over-current quench test and self-protecting behavior of a 7 T/78 mm multi-width no-insulation REBCO magnet at 4.2 K,” *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 11, Sept. 2015.
- [6] C. Kim *et al.*, “Design, Fabrication, and Testing of a Full-Scale HTS Coil for a 10 MW HTS Wind Power Generator,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 31, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2021.
- [7] T. Lécrevisse and Y. Iwasa, “A (RE)BCO Pancake Winding With Metal-as-Insulation,” *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 26, no. 3, pp. 1-5, Apr. 2016.
- [8] 이태성, “층간 물질에 따른 고온초전도 계자 마그네틱의 시정수와 안정성 평가에 관한 연구,” 석사학위논문, 연세대학교 대학원, 2013.
- [9] 김형욱, “금속-절연체 전이 물질을 이용한 2세대 고온초전도 마그네틱의 안정도 확보 및 자기장 손실 개선”, 박사학위논문, 울산대학교 대학원, 2016.

- [10] S. Kim, H *at el.*, "Current Bypassing and Transient Stability in a Partially Insulated HTS Coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 28, no. 3, pp. 1-5, Apr. 2018.
- [11] 김석환, 한송엽, **초전도 공학 개론**, 대영사. 2004.
- [12] Y. Kim, *at el.*, "Numerical Analysis on Bifurcated Current Flow in No-Insulation Magnet," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 24, no. 3, pp. 1-4, Jun. 2014.
- [13] D. G. Yang, *at el.*, "A Study on Electrical Characteristics of Multilayered Metallic-Insulation Coils," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 27, no. 4, pp. 1-6, Jun. 2017.
- [14] M. H. Sohn, *at el.*, "Contact resistance characteristics of 2G HTS coils with metal insulation," *Progr. Supercond. Cryogenics.*, vol. 20, no. 4, pp. 26 - 30, Dec. 2018.
- [15] X. Liu *et al.*, "The Research on No-Insulation ReBCO Racetrack Coil," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 29, no. 5, pp. 1-5, Aug. 2019

감사의 글

석사 졸업을 앞에 두고 지난 석사 과정을 돌아보니 연구 활동에 몰두하여 주변을 돌아보지 못한 적이 많았습니다. 지금 여기까지 올 수 있었던 것은 많은 분의 도움 덕분이라고 생각합니다. 그동안 큰 도움을 주신 많은 분께 이 기회를 빌려 감사의 인사를 포함합니다.

우선 본 논문을 지도해주신 김호민 교수님께 감사 인사를 드립니다. 아직도 미숙한 부분이 많아 교수님께 부끄러운 결과를 보여드리는 일이 많았습니다. 항상 세심한 관심, 격려와 조언을 해주시는 교수님이 있었기에 여기까지 올 수 있었습니다. 아직도 미숙한 부분이 많지만, 앞으로도 많은 지도편달을 부탁드립니다 항상 건강하시기 바랍니다.

본 논문이 좋은 논문이 될 수 있도록 세심한 심사와 조언해주시고 허락해주신 김세호 교수님, 진영규 교수님께 감사의 말을 전합니다. 그리고 항상 전기공학과와 발전을 위해서 물심양면으로 노력해주시는 김일환 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님, 오성보 교수님, 최영준 교수님께 감사의 인사를 드립니다. 전기공학과에 와서 많은 것을 배우고 갑니다. 전기공학과와 모든 교수님께 다시 한 번 존경과 감사를 포함합니다.

지난 연구 활동에 있어 많은 도움을 주신 모든 분께 감사함을 전하고 싶습니다. 자주 연락드리지도 못했음에도 불구하고 항상 연구 활동에 많은 격려와 도움을 아끼지 않으시는 신안산대 윤용수 교수님 감사합니다. 항상 많은 조언과 격려를 아끼지 않으시고 초전도 분야의 발전을 위하여 힘써 주시는 전기연구원 조영식 박사님 그리고 아무것도 모르던 학부 시절부터 많은 지원을 해주시는 김형욱 박사님께 감사 인사를 드립니다. 제주도까지 오셔서 무절연 마그네티에 대하여 세미나를 해주신 서울대학교 한승용 교수님께도 감사의 인사를 전합니다. 그리고 항상 본인 일처럼 생각하여 연구가 무사히 마무리될 수 있도록 도움을 주시는 다운 에스피이의 박희주 대표님, 싸이엔텍의 조성원 대표님과 조현철 과장님께 감사의 인사를 전합니다.

항상 전기공학과와 운영에 최선을 다해주시는 학과 사무실의 대진이형, 정민이에게 감사하며, 지금은 사회에 나가 있는 태형이형, 경훈이형 고맙습니다. 그리고 항상 따뜻한 인사를 건네주시고 어리숙한 질문에 답해주시는 진홍이형, 명석이형, 호산이형, 상현이형, 그리고 연구 활동에 있어 많은 도움을 주신 기훈이형, 민재형, 항상 친근하게 대해 주시는 창우형, 석사 과정을 같이 헤쳐온 현이에게도 고마움을 전합니다. 기

술적으로 어려움이 있을 때 본인 일처럼 많은 도움을 주시는 프리에너지 김대현 대표님, 거성 전기 차우점 대표님에게도 감사 인사를 전합니다. 형님들 도움이 있어 연구를 무사히 진행할 수 있었습니다. 이외에도 석사 과정 동안 따뜻한 인사를 주고받은 전기공학과 학부 그리고 대학원 선후배와 동기들에게 감사 인사를 전합니다.

지난 기간 동안 코로나로 여러모로 힘들었던 상황이었지만 같이 헤쳐나온 초전도 응용연구실 식구들에게 감사의 인사를 드립니다. 연구 활동에 몰두할 수 있게 도움을 준 홍비, 취업하고 적응하기 힘들었을 상황에서도 많은 요구를 선뜻 들어주었던 재형이, 그리고 항상 옆에서 최선을 다해서 도움을 주시는 후릉형 감사합니다. 항상 격려해주시고 좋은 말씀 많이 해주시는 사일이형, 연구활동 과정에서 힘든 순간들을 같이 보내주었던 창주형, 정협이에게 감사의 인사를 전합니다. 그리고 많은 도움을 주지 못했어도 항상 먼저 연락하고 응원해 주는 준혁이, 병영이, 동륜이, 영호, 준영이, 태영이, 준희에게 고마움을 전합니다. 그리고 항상 막히고 힘들 때 항상 옆에서 쉴 수 없이 많은 격려와 도움을 준 김지형 박사님에게 감사의 말을 전합니다. 지금까지 형의 도움이 있기에 많은 용기를 얻고 여기까지 올 수 있었습니다. 앞으로도 많은 조언을 부탁드립니다 항상 건강하시기를 바랍니다.

대학에 입학하고 석사 과정까지 저의 건강과 편의를 돌봐주신 어머니, 아버지 감사합니다. 집에 자주 찾아뵙지 못한 아들이지만, 항상 믿고 응원해 주셔서 감사합니다. 그리고 나를 대신해서 궂은 집안일을 맡아서 도와준 민석아 고맙다. 앞으로도 건강하고 씩씩한 모습으로 있어 주기 바란다. 그리고 항상 저희 가족을 걱정해주시고 많은 격려의 말을 아끼지 않으시는 윤숙이 이모 감사합니다. 항상 먼저 연락해주시고 많은 응원을 해주시는 큰아버지, 큰어머니 감사합니다. 그리고 지용아 코로나 조심하고 건강하게 있어 주기 바란다.

지금까지 수행했던 많은 연구 활동이 시작할 때 두렵고 끝나면 아쉬운 부분들이 많았습니다. 이번 석사 과정을 계기로 더 발전할 수 있도록 노력하겠습니다. 그동안 도움을 주셨던 모든 분께 다시 한 번 감사합니다. 그리고 마지막으로 지난 석사 과정을 헤쳐서 여기까지 온 나에게 감사를 보냅니다.

2021년 8월

채 윤 석 올림