

액체질소 내에서 뇌 임펄스전압에 대한 압력별 GFRP의 절연파괴 특성 분석

A Study on the Dielectric Characteristics of GFRP in LN₂ under Lightning Impulse Voltage According to Pressure

홍종기* · 허정일* · 남석호* · 강형구†
(Jonggi Hong · Jeong Il Heo · Seokho Nam · Hyoungkul Kang)

Abstract - A study on the dielectric characteristics of the Glass Fiber Reinforced Plastic (GFRP) is important for designing a reliable high voltage superconducting machines such as transmission superconducting fault current limiters, superconducting cables, and superconducting transformers. In this paper, dielectric experiments of the GFRP under lightning impulse voltage are conducted in liquid nitrogen(LN₂) according to various experimental conditions such as the thicknesses of the GFRP, the diameters of electrode systems and the pressures. The dielectric characteristics of the GFRP are analyzed by using a Finite Elements Method(FEM) according to various field utilization factors. It has been reported that the electrical insulation design of the GFRP would be conducted by considering the mean electric field intensity(E_{mean}) distributed inside the GFRP. In this study, it is found that the dielectric performance of the GFRP could be explained by not only E_{mean} but also the maximum electric field intensity (E_{max}). Finally, the empirical formulae of the GFRP to estimate an electrical breakdown voltage at sparkover under the lightning impulse condition are deduced. It is expected that the presented experimental results in this paper are helpful to design electrically reliable high voltage superconducting machines using the GFRP as an insulation material.

Key Words : Dielectric characteristics, Electrical breakdown voltage, Flashover voltage, Sphere to plane electrode system, Utilization factor

1. 서 론

고전압 초전도전력기기란 일정 온도 이하에서 전기저항이 완전히 "0"이 되는 초전도체의 성질을 이용하여 개발된 전력케이블, 변압기, 한류기 등을 말한다. 고전압 초전도전력기기는 전력계통 내에 설치되었을 때 높은 효율성과 신뢰성, 그리고 환경친화성 등을 가진다는 장점을 가지고 있기 때문에 현재 큰 문제로 대두되고 있는 온실가스 배출량 감소 등 심각한 환경파괴문제를 해결할 수 있는 방법의 하나로서 국·내외적으로 초전도 전력기기 개발에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 또한 전 세계적으로 원활한 전력공급 및 효율성 향상을 위하여 전력계통의 고전압화가 이루어지고 있는 실정이며 일부 국가에서는 1,000kV급 이상의 송전계통을 사용하기도 한다. 이와 같이 전력계통이 고전압화되고 있는 추세에 따라 그에 따르는 절연파괴 사고 역시 급증하고 있는 실정이다. 이와 같은 절연파괴 사고는 막대한 경제적 손실과 함께 심각한 인명피해를 초래할 수 있기 때문에 고전압 환경 하에서 신뢰성이 높은 고전압 초전도전력기기를 개발하는 연구는 매우 중요한 의미를 가지게 된다. 고전압 초전도전력기기를 실계통에 적용하기 위해서는 고전압 초전도

전력기기 개발에 사용되는 절연물질에 대한 절연파괴 특성 연구가 반드시 선행되어야 할 것이다.

고전압 초전도전력기기 개발을 위한 절연물질로는 전력기기 시스템을 절연특성이 우수한 과냉질소 냉각시스템으로 만들어주기 위하여 주입되는 가압기체와 초전도코일을 임계 온도 이하의 온도로 냉각하여 초전도 성질을 가지게 해주는 냉매인 액체질소, 그리고 초전도선재 권선용 보빈을 포함한 복합절연용으로 사용되는 고체 절연물질이 있을 수 있다. 고체 절연물질 중에서도 GFRP는 액체질소와 같은 극저온 환경 하에서 기계적 특성뿐만 아니라 전기적 특성이 다른 절연체에 비하여 우수하기 때문에 고전압 초전도전력기기 개발을 위한 고체 절연물질로 자주 사용되고 있다. 본 논문에서는 이와 같은 GFRP에 대한 절연파괴실험을 수행하고 그 결과에 대한 특성을 분석하였다. 4가지 종류의 스테인레스 스틸 재질의 구 대 평판 전극시스템을 제작하고 유한요소해석을 통해 GFRP 내부의 전계특성을 분석하였으며 뇌 임펄스전압 조건에 대한 전극구조, GFRP 두께, 압력에 따른 다양한 절연파괴 실험을 수행하였다. 또한 전계해석을 통해 산출된 전계 이용률과 절연파괴 시 평균전계값, 절연파괴 시 최대전계값을 분석한 결과, 절연파괴전압값과 전계 이용률 사이에 일정한 함수관계가 성립한다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 뇌 임펄스전압에 대한 GFRP의 절연파괴 특성은 평균전계뿐만 아니라 최대전계값이 전계 이용률과도 함수관계를 가진다는 사실을 알 수 있었다. 본 연구에서는 이와 같은 특성분석을 통하여 GFRP의 관통 절연파괴전압값을 계

* 준 회원 : 한국교통대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 한국교통대 전기공학과 조교수

E-mail : kang@ut.ac.kr

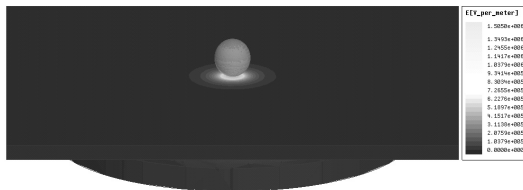
접수일자 : 2012년 9월 11일

최종완료 : 2012년 9월 24일

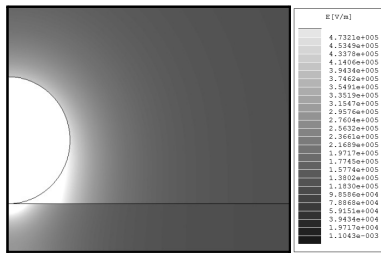
표 1 구 대 평판 전극의 크기와 GFRP 두께에 따른 전계 이용률

Table 1 The calculated field utilization factors according to the diameter of sphere electrodes and the thickness of GFRP

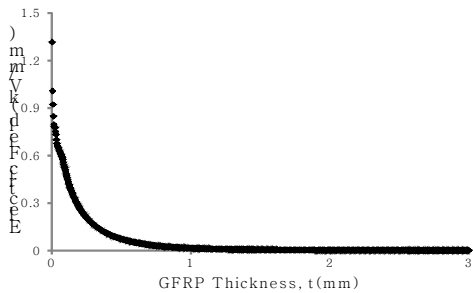
GFRP thickness (mm)	Diameter of sphere (mm)			
	2	8	30	50
1	0.2372	0.488	0.539	0.6232
2	0.1355	0.3661	0.3835	0.4462
3	0.1018	0.2578	0.3308	0.3879



(a) GFRP 전계 해석 결과



(b) GFRP 내부의 전계해석 결과



(c) 구 전극과 평판 전극 간 최단 직선에의 전계분포

그림 1 구 대 평판 전극시스템의 FEM 해석 결과

Fig. 1 FEM analysis result of a sphere to plane electrode system

산할 수 있는 함수식을 도출하였다.

2. 유한요소해석

여러 가지 종류의 구 대 평판 전극과 고체절연물인 GFRP의 두께에 따른 GFRP내부의 전계해석을 분석하였다. 이때 GFRP의 유전율은 4.4로 계산하였다. 그림 1에는 구의 직경이 8 mm, 평판전극의 직경이 80 mm이고 평판전극

표 2 구 대 평판 전극시스템과 GFRP의 사양

Table 2 Specifications of sphere to plane electrode system and GFRP

Material	stainless steel 315
Electrode system type	sphere to plane
Sphere electrode (mm)	diameter:2, 8, 30, 50
Plane electrode (mm)	diameter:80, thickness:10 radius of curvature:5
GFRP (mm)	width:230, height:250, thickness:1, 2, 3

테두리의 곡률반경이 5mm인 구 대 평판 전극시스템으로서 구 전극에 1 kV의 전압을 인가하고 평판전극에는 접지를 연결하였으며 구 전극과 평판 전극 사이에 두께 3 mm인 GFRP판을 삽입하고 GFRP 내부의 전계분포를 해석한 결과를 나타내었다. GFRP 내부의 전계분포를 해석한 결과, 그림 1(b)와 같은 구조에서 전극과 평판전극 사이의 GFRP내부에 최단거리의 직선 선분을 가정하고, 이 선분의 전계분포 계산 결과를 그림 1(c)에 나타내었다. 전로과피현상이 일어나는 전위경도 경로 내에서의 최대전계(E_{MAX})는 약 1.293 kV/mm이고 평균전계(E_{MEAN})는 약 0.333 kV/mm로 계산되었다. 전계 이용률이란, 전극시스템 간의 전계의 평등도를 나타내는 값을 의미하는 것으로서 범위는 0에서부터 1까지의 값을 가지며 식 (1)과 같이 표현할 수 있다. 식 (1)에서 d는 전극 간의 거리를 의미하여 V는 인가전압을 나타낸다. 전계 이용률값이 1에 가까워질수록 전극시스템 내의 전계 평등도가 높음을 의미한다[1]. 식 (1)을 이용하여 각 조건 하에서의 전계 이용률을 산출하였다.

$$\text{전계이용률} (\xi) = \frac{V}{d E_{MAX}} = \frac{\text{평균전계} (E_{MEAN})}{\text{최대전계} (E_{MAX})} \quad (1)$$

본 논문에서는 고체절연체인 GFRP의 뇌 임펄스 전압에 대한 플래시오버 전압값을 분석하여 전계 이용률과의 관계를 함수적으로 나타내고자 하였다. 이와 같은 절연과피실험에는 GFRP의 두께에 대한 영향을 살펴보기 위하여 1 mm에서부터 3 mm까지의 두께를 가지는 GFRP와 구 전극의 직경에 따른 영향을 살펴보기 위하여 4가지의 서로 다른 크기의 구 전극에 따른 절연과피실험과 전계해석을 수행하여 플래시오버가 발생하는 GFRP 내부에서의 최대전계와 평균전계를 산출하였다. 또한 식 (1)을 이용하여 계산한 전계 이용률을 표 1에 나타내었다. 표 1을 살펴보면 본 실험 조건에서의 전계 이용률은 최소 0.1018에서부터 최대 0.6232까지 범위를 나타내며 구 전극의 직경이 커질수록, GFRP의 두께가 얇아수록 값이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

3. 뇌 임펄스 및 AC 절연과피 실험

3.1 모의전극 구성

본 논문에서는 절연과피 실험으로부터 전극 표면의 손상

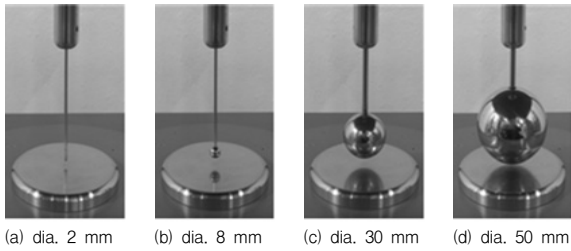


그림 2 직경에 따른 구 대 평판 전극시스템

Fig. 2 Sphere to plane electrode system according to diameter

이 최소화될 수 있도록 기계적 강도가 우수한 스테인레스 스틸재질의 전극시스템을 설계, 제작하였다. 구 대 평판 전극시스템을 사용한 이유는 구 전극의 직경 크기와 전극 사이의 간격을 조절함으로써 다양한 이용률의 변화를 모사할 수 있기 때문이다. 또한 기계적 충격 등에 의한 스트레스로 인하여 구 전극의 중심축이 변형되어도 전극 형상에는 큰 변화가 없기 때문에 전계 특성의 변화도 최소화될 수 있기 때문이다. 표 2에는 실제 제작된 구 대 평판 전극시스템과 GFRP의 사양을 나타내었고 그림 2에는 실제 제작된 구 대 평판 전극시스템의 사진을 나타내었다.

3.2 절연파괴실험 장비 구성

고전압 전력기기에 쓰이는 절연물의 절연 특성을 해석하는 방법 중의 하나로 절연파괴 전압을 측정하는 방법이 있다. 일반적으로 산업용 전력기기의 절연파괴 특성 실험에는 주로 뇌 임펄스 절연파괴 실험과 AC 절연파괴 실험이 사용되고 있는데 본 논문에서는 뇌 임펄스 전압에 대한 전로절연파괴 실험 조건으로 GFRP의 절연파괴 특성 분석을 수행하였다. 뇌 임펄스 절연파괴 실험은 운전 중 발생하는 임펄스 서지 또는 과도적인 이상 전압에 대한 고전압전력기기의 절연강도를 실험하는 목적을 가지며 절연특성을 검토하는데 있어서 중요한 실험 항목이다. 실험에 사용된 뇌 임펄스 전원 공급장치는 최고 출력전압이 600 kV, 출력파형의 파두 T1은 1.2 μs이고 파미 T2는 50 μs이며 오차는 ±5%로 측정되었다.

3.3 절연파괴실험

본 논문에서는 액체질소 내에서의 고체절연체인 GFRP의 두께와 구 전극의 크기에 따른 뇌 임펄스전압의 절연파괴 실험을 수행하였다. GFRP의 관통 절연파괴 특성을 측정하기 위하여 연면방전이 발생하는 것을 최대한 억제할 뿐만 아니라 초전도전력기기의 냉각조건인 극저온 상태를 유지하기 위하여 절연내력특성이 우수한 77 K의 액체질소 속에서 모든 실험을 수행하였다[2]. GFRP판은 표면의 불순물을 제거하기 위하여 알코올로 세척 후 건조하였으며 인가전압에 의하여 GFRP판이 관통(Penetration)되어 플래시오버된 것을 절연파괴로 측정하였다. 또한 측정된 절연파괴전압값은 절연파괴가 일어나기 직전 값인 내전압값을 선정하였다. 1회

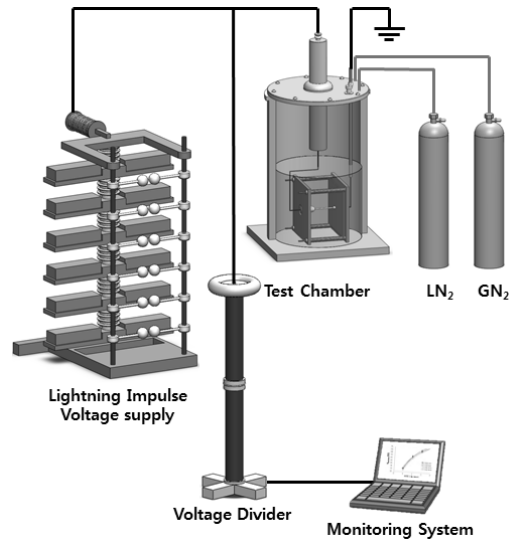


그림 3 절연파괴실험 모식도

Fig. 3 Schematic sketch of experimental setup

의 절연파괴 실험 후 구 전극과 평판전극에 생기는 손상면을 최소화하기 위해서 1500 # 샌드페이퍼로 표면을 정리하였으며, 극저온 상태인 액체질소 내에 구 대 평판전극과 GFRP를 넣을 때 발생하는 기포에 의하여 절연파괴 전압값에 영향을 미칠 수 있기 때문에 모든 실험에는 약 20여분의 안정화 시간을 가지고 절연파괴실험을 수행하였다 [3]. 그림 3은 절연파괴 실험을 위한 모식도를 나타내며 그림 4에는 뇌 임펄스전압에서의 GFRP두께와 구 직경에 따른 절연파괴 전압값을 나타내었다. 이때 세로축에 나타낸 평균절연파괴 전압값($V_{BD,MEAN}$)은 동일한 조건 하에서 5~6회 반복하여 실험을 수행한 후 얻은 절연파괴 확률이 50%인 값을 나타낸다. 이와 같은 50% 절연파괴확률을 가지는 절연파괴값은 통계분석 프로그램에 의하여 계산한 결과값이며, 모든 실험 결과는 통계학적으로 신뢰할 수 있는 값을 확인하였다. 전극시스템은 그림 3에서 보는 바와 같이 구 전극이나 평판 전극 표면에 발생할 수 있는 기포가 빠른 시간 내에 소멸될 수 있도록 두 전극이 수평이 되도록 배치하였으며, 시험용 챔버에 viewport를 통하여 기포의 소멸 여부를 확인하였다. 또한, 1기압 이상의 조건 하에서는 높은 압력으로 인하여 전극시스템 표면에 존재하는 기포가 억제되는 사실을 확인할 수 있었다.

그림 4에서 보는 바와 같이 GFRP의 뇌 임펄스전압에 대한 평균 절연파괴 전압값은 GFRP의 두께가 증가함에 따라 포화되며 증가하는 변화를 보였지만 구 전극의 직경에 따라서는 큰 변화를 보이지 않는다는 것을 확인할 수 있었다. 일반적으로 기체절연체와 액체절연체는 면적효과에 의해서 면적이 작은 구 전극에 비하여 구 면적이 클수록 확률적으로 자유전자가 쉽게 방출되어 전자상태로 인한 절연파괴전압값이 포화하며 증가하는 경향을 가지는 것으로 알려져 있다 [4]. 하지만 GFRP와 같은 고체절연체의 관통 절연파괴와 같은 경우에는 본 실험결과에서 보는 바와 같이 전극 사이에 고체절연체인 GFRP가 위치해 있기 때문에 면적효과에 의하여 구 전극의 직경에 따라 방전개시전압값이 기체나 액

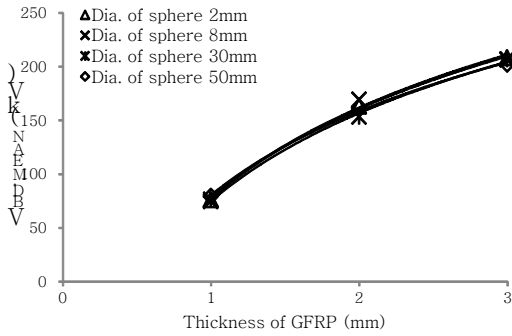


그림 4 뇌 임펄스전압 조건에서의 두께에 따른 GFRP의 $V_{BD,MEAN}$

Fig. 4 $V_{BD,MEAN}$ under lightning impulse breakdown voltage test of GFRP according to thickness

체절연물에서와 같이 다를 수 있지만 고체절연물인 GFRP를 관통하여 플래시오버를 일으키는 절연파괴전압값은 구 전극의 직경에 따라 크게 다르지 않음을 확인할 수 있었다. 즉, 고체절연물에서는 고전압 인가로 의하여 전극에서 전자가 쉽게 방출된다고 하여도 고체절연물 내 전자 드리프트 속도는 기체와 같이 가속화되지 않기 때문에 중성분자를 전리시키기 위해서는 전극의 직경과 무관하게 외부에서 인가하는 전계의 세기에만 비례한다고 할 수 있다. 결과적으로 그림 4를 통하여 고체절연체인 GFRP는 면적효과에 의한 구 전극 직경의 크기에 따른 절연파괴전압값의 변화가 기체나 액체에 비하여 작음을 확인할 수 있었다. 또한 GFRP 두께에 따른 절연파괴전압값은 포화하면 증가하는 추세를 확인할 수 있었다. 이는 전자가 고체절연물인 GFRP가 두꺼울수록 관통되는 GFRP의 경로가 길어지므로 절연파괴가 발생하기 위해서는 더 많은 외부 에너지가 필요하기 때문이다.

3.4 압력에 따른 절연파괴 특성 실험

고전압 초전도전력기기는 일반적으로 통전전류의 증가와 절연내력 특성 향상, 그리고 열전도도 향상 등의 이점으로 인하여 과냉질소 냉각조건 하에서 운전하고 있다. 일반적으로 과냉질소 냉각조건을 만들기 위해서는 가압기체를 이용하여 액체질소의 압력을 1기압 이상으로 유지한다. 따라서 본 논문에서는 고체절연체로 GFRP를 사용하는 고전압 초전도전력기기의 절연설계를 위해서 액체질소 내에서의 압력 변화에 따른 GFRP의 절연파괴 특성 분석을 수행하였다. 실험용 모의 전극시스템이 들어 있는 Test chamber는 과냉질소 냉각시스템 조건을 모사하기 위하여 기체질소를 이용하여 1기압에서 4기압까지 가압하여 실험을 수행하였다. 이때 구 전극 직경의 크기가 2 mm인 조건 하에서 GFRP의 두께를 변화시켜 가면서 뇌 임펄스전압에서의 압력에 따른 절연파괴 실험을 수행하였다. 기존의 방식대로 $V_{BD,MEAN}$ 는 절연파괴가 발생할 확률이 50%인 전압값의 크기를 나타낸다. 그림 5에는 압력과 GFRP의 두께에 따른 $V_{BD,MEAN}$ 의 변화를 나타내었다. 기체절연체나 액체절연체인 경우에는 압력이 상승함에 따라 절연파괴전압값도 역시 포화하는 경향을 보

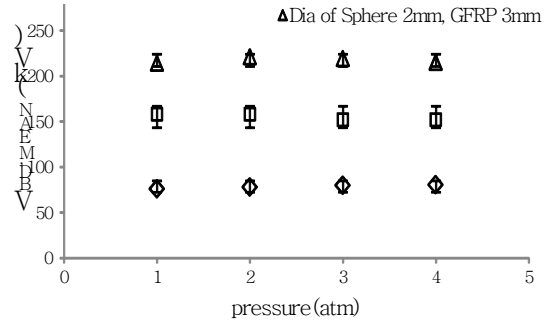


그림 5 뇌 임펄스전압 조건에서의 압력에 따른 GFRP의 $V_{BD,MEAN}$

Fig. 5 $V_{BD,MEAN}$ under lightning impulse breakdown voltage test of GFRP according

이며 상승한다고 보고되고 있다 [5]-[6]. 이는 기체나 액체의 압력이 상승할수록 원자로부터 전리된 전자의 움직임이 자유롭지 못하여 연속적인 전리현상이 억제되기 때문인 것으로 추측된다. 하지만 고체절연물인 GFRP에서는 그림 5에서 보는 바와 같이 4기압 이하의 압력 조건 하에서 압력에 따른 $V_{BD,MEAN}$ 의 변화가 크게 없었다. 즉, 기체절연체나 액체절연체와는 달리 GFRP는 4기압 이하의 압력조건에서 GFRP가 관통되어 완전방전으로 인한 플래시오버가 발생하는데 압력 상승으로 인한 전자의 전리억제 효과가 거의 없으며, 전자의 자유행정거리가 짧아져 드리프트 속도의 증가가 거의 없으므로 $V_{BD,MEAN}$ 의 값이 크게 변화하지 않는 것으로 판단할 수 있다.

4. 절연파괴 실험 결과 및 분석

고체절연체인 GFRP의 뇌 임펄스전압에 대한 절연파괴 실험을 통해 얻은 절연파괴평균전압값($V_{BD,MEAN}$)과 구 전극에 1 kV의 전압을 인가하여 유한요소해석을 통해 얻은 평균전계값($E_{MEAN,1kV}$) 및 최대전계값($E_{MAX,1kV}$)의 크기를 서로 곱하여 절연파괴 시 평균전계값($E_{BD,MEAN}$)과 절연파괴 시 최대전계값($E_{BD,MAX}$)을 구하였으며, 관계를 각각 식 (2)와 식 (3)과 같이 나타내었다.

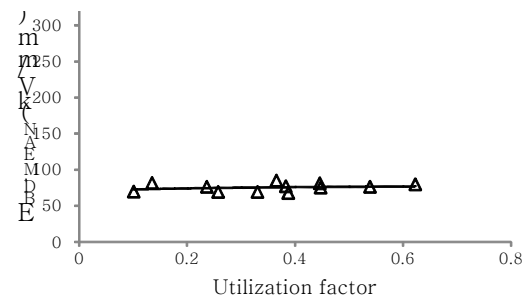


그림 6 뇌 임펄스 전압 조건에서의 $E_{BD,MEAN}$ 와 전계 이용률과 의관계

Fig. 6 Functional relations between $E_{BD,MEAN}$ and utilization factor under lightning impulse breakdown voltage

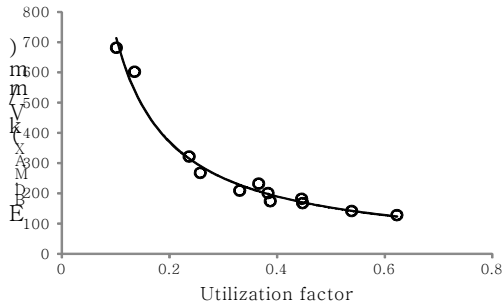


그림 7 뇌 임펄스전압 조건에서의 $E_{BD,MAX}$ 와 전계 이용률과의 관계

Fig. 7 Functional relations between $E_{BD,MAX}$ and utilization factor under lightning impulse breakdown voltage

$$E_{BD,MEAN} = E_{MEAN,1kV} \times V_{BD,MEAN} \quad (2)$$

$$E_{BD,MAX} = E_{MAX,1kV} \times V_{BD,MEAN} \quad (3)$$

또한 식 (2)와 식 (3)을 통해 산출된 전계 이용률에 따른 $E_{BD,MEAN}$ 과 $E_{BD,MAX}$ 의 그래프를 그림 6과 그림 7에 나타내었으며 추세선을 통하여 전계 이용률과 전계 크기 사이에서의 함수관계를 살펴보았다. 그 결과, 고체절연체인 GFRP의 액체질소 내에서의 절연과피특성은 뇌 임펄스전압 조건 하에서 전계 이용률에 따라 $E_{BD,MEAN}$ 및 $E_{BD,MAX}$ 에 대한 함수 관계를 가진다는 사실을 확인할 수 있었다. 그림 6 및 그림 7에서 보는 바와 같이 식 (2)와 (3)을 통하여 계산한 값을 전계 이용률에 대하여 그래프로 나타내면 절연과피 시의 평균전계값인 $E_{BD,MEAN}$ 에 대해서는 전계 이용률의 변화와 무관하게 항상 일정한 값 (약 76 kV/mm)을 가지며, 최대전계값인 $E_{BD,MAX}$ 에 대해서는 전계 이용률의 변화에 따라 지수함수의 관계를 가진다는 사실을 알 수 있었다. 즉, GFRP의 절연과피전압은 GFRP 내부에서의 평균전계값과 최대전계값 모두를 이용하여 계산할 수 있다. 일반적으로는 고체절연물의 절연설계를 위해서 $E_{BD,MEAN}$ 와 같은 일정한 상수값을 이용하여 계산할 수 있지만, 그림 7에서 보는 바와 같이 이용률과 안전율에 따라 변하는 $E_{BD,MAX}$ 값을 선택하는 것이 보다 효율적이다. 다음의 식 (4)와 식 (5)는 그림 6과 그림 7을 통하여 얻을 수 있는 액체질소 내에서 뇌 임펄스전압 조건에 대한 GFRP의 절연과피특성 함수식이다.

$$E_{BD,MEAN,IMP} = 78.049 \times \xi^{0.0318} = 76kV/mm \quad (4)$$

$$E_{BD,MAX,IMP} = 78.047 \times \xi^{-0.966} \quad (5)$$

이와 같은 함수식에 의하여 전계 이용률에 따른 전계값 ($E_{BD,MEAN}$ 또는 $E_{BD,MAX}$)을 유한요소 해석 시 전극에 1kV를 입력하여 계산할 수 있는 전계값 ($E_{MEAN,1kV}$ 또는 $E_{MAX,1kV}$)으로 나누면 어떤 조건 하에서 GFRP가 관통되어 절연과피가 발생하는 전압값을 계산할 수 있다. 본 연구 결과를 통해서 알 수 있는 바와 같이 고전압 초전도전력기기 개발을 위한 GFRP 구조물의 절연설계를 위해서는 식 (4)

또는 식 (5)를 통해서 산출된 $E_{BD,MEAN}$ 과 $E_{BD,MAX}$ 을 이용하여 $V_{BD,MEAN}$ 을 도출할 수 있다. 즉, 고전압 초전도전력기기 구조 내에서의 전극시스템 구조가 준평등전계 범위일 경우에 GFRP의 절연과피 특성은 절연과피 시 평균전계 뿐만 아니라 최대전계에 의해서도 설명이 가능하다는 사실을 밝혀 낼 수 있었다.

5. 결 론

본 논문에서는 극저온 하에서 기계적, 전기적 특성이 우수하여 고전압 초전도전력기기 개발용 고체 절연물로 주로 사용되고 있는 GFRP의 뇌 임펄스전압에 대한 절연과피 특성을 분석하였다. 고전압 초전도전력기기의 극저온 환경을 고려하여 모든 실험을 77K의 액체질소 조건 하에서 수행하였다. 또한 인가전압은 뇌 임펄스전압이었으며 고체절연물인 GFRP에 대한 구 전극의 크기, GFRP의 두께, 그리고 액체질소의 압력 변화에 따른 절연과피 특성 실험을 수행하였다. 절연과피 특성 실험 결과, GFRP 두께에 따른 절연과피 평균전압값($V_{BD,MEAN}$)은 기체절연체나 액체절연체의 특성과는 다르게 구 전극의 크기에 따라 큰 변화를 보이지 않았다. 반면 GFRP의 두께가 두꺼울수록 절연과피평균전압값은 포화하며 증가한다는 사실을 알 수 있었다. 또한 압력에 따른 절연과피실험 결과, GFRP는 4기압 이하의 조건에서는 압력변화에 따른 절연과피전압값의 변화가 크지 않음을 확인할 수 있었다. 준평등전계 조건하에서 GFRP 내부의 전계를 유한요소해석법을 이용하여 분석한 결과, 준평등전계 조건 하에서GFRP의 절연과피 특성은 $E_{BD,MEAN}$ 뿐만 아니라 $E_{BD,MAX}$ 의 특성을 이용하여 설명할 수 있다는 사실을 알아 내었다. 또한, 본 논문에서는 GFRP의 $E_{BD,MEAN}$ 와 $E_{BD,MAX}$ 절연과피특성을 전계 이용률에 따른 함수로 수식화하여 제시하였다.

향후 고체절연체인 GFRP에 대한 절연과피특성 분석으로 AC 전압 조건과 DC 전압조건의 절연과피실험 및 다양한 압력변화에 따른 절연과피실험을 수행할 것이며 평등전계 조건을 포함한 불평등 조건 하에서의 절연과피 특성 실험을 추가적으로 진행할 계획이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education, Science and Technology (2010-0003558).

The research was supported by a grant from the Academic Research Program of Korea National University of Transportation in 2012.

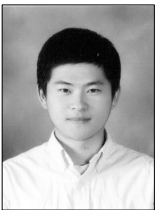
REFERENCES

[1] Seok Ho Nam, Hyoungku Kang, "A study on the

Lightning Impulse Dielectric Characteristics of Air for the Development of Air-Insulated High Voltage Apparatuses”, Journal of the Korea Institute of Electrical Engineers, Vol. 60, No. 5, pp. 1005-1009, 2011

- [2] Jin Bae Na, Hyoungku Kang, Young Jin Hwang, Seong Eun Yang, Dong Keun Park, Duck Kweon Bae, Tae Kuk Ko, “Experimental Study on the Electrical Breakdown Characteristics of Sub-cooled Liquid Nitrogen for Designing a High Voltage Superconducting Machine”, *IEEE Trans. Applied Superconductivity*, Vol. 20, No. 3, pp. 1662-1666, June, 2010
- [3] Jeong Il Heo, Jonggi Hong, Seokho Nam, Hyoungku Kang, “Analysis on the insulation characteristics of SMC under AC voltage”, Journal of the Korea Institute of Electrical Engineers Summer Conference 2012, 12-p-029
- [4] Jong Il Kim, “High voltage discharge plasma theory and applications”, Doseo publication interview, 2004.
- [5] Li feng, Yang Woo Yoo, Dong Kyu Kim, Bok Hee Lee “Dielectric Characteristics of SF₆ and Dry-Air Gases under Lightning Impulse Voltage”, Journal of the Korea Institute of Illumin角度 and Electrical Installation Engineers, Vol. 24, No. 8, pp. 142-149, 2010
- [6] J. B. Na, T. K. Ko, H Kang, B. Y. Seok, and T. J. Kim, “Analytical and Experimental studies on Dielectric Characteristics of High Voltage Superconducting Machines in Liquid Nitrogen”, Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 13, No. 1, pp. 46-50, 2011
- [7] Hyoungku Kang, Tae Kuk Ko, “A Study on the Dielectric Characteristics of Insulation Gases for a Sub-cooled Liquid Nitrogen System”, Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 12, No. 1, pp. 52-55, 2010

저 자 소 개



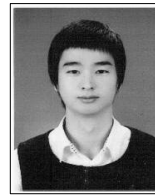
Jonggi Hong (洪 鐘 基)

He received the B.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Chungju National University, Chungju, Korea, in 2012. He is currently a M.S. course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea.
Tel : 010-7158-6889
E-mail : hjg@ut.ac.kr



Jeongil Heo (許 禎 日)

He received the B.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Chungju National University, Chungju, Korea, in 2012. He is currently a M.S. course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea.
Tel : 010-8574-0256
E-mail : jiheo@ut.ac.kr



Seokho Nam (南 碩 昊)

He received the B.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Chungju National University, Chungju, Korea, in 2011. He is currently a M.S. course in the Department of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea.
Tel : 010-3109-2191
E-mail : smalliberty@cjnu.ac.kr



Hyoungku Kang (姜 亨 求)

He received the B.S. and M.S. degree in the Department of Electrical Engineering, Sung Kyun Kwan University, Suwon, Korea, in 1997 and 1999, respectively and the Ph.D. in the School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, in 2005. He was Chief Researcher in Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Gyeonggi-do, Korea, during 2005-2009. He is currently a Professor in the Dept. of Electrical Engineering, Korea National University of Transportation, Chungju, Korea.
Tel : 043-841-5145
Fax : 043-841-5140
E-mail : kang@ut.ac.kr