

## 고온 초전도 변압기 설계를 위한 극저온환경에서 DC/AC의 절연지별 절연파괴 특성연구

박태건\*, 이상화\*, 신우주\*, 성재규\*, 오석호\*, 황재상\*, 이방욱\*  
한양대학교\*

### Study on the Comparison between DC and AC for Breakdown Characteristics of Dielectric Insulating Materials for Design of HTS Transformer in Cryogenic Environment

Tae-Gun Park\*, Sang-Hwa Lee\*, Woo-Ju Shin\*, Jae-Kyu Seong\*, Seok-Ho Oh\*, Jae-Sang Hwang\*, Bang-Wook Lee\*  
SPD&S Lab, Dept. of Electric Engineering, Hanyang University\*

**Abstract** - 고온 초전도(HTS) 변압기는 절연수명의 손실 없이 과부하 용량의 증가와 효율의 향상이 가능하여 기존의 변압기와는 달리 구조물의 소형화로 공간 배치가 용이하고 환경 친화적 이어서 전력시스템 운용 전반에 걸쳐 많은 이점을 제공한다. 하지만, 이러한 이점에도 불구하고 AC전압이 인가되었을 때, 교류손실에 의한 심각한 효율의 감소는 불가피하다. 따라서, HTS 변압기뿐만 아니라 고온초전도전력기들에 대한 DC전압의 적용은 초전도상에서 전기적 저항이 거의 0이라는 큰 이점을 가지고 있기 때문에 초전도 전력기 시스템에서 최선의 선택으로 여기어지고 있다. 그러므로 DC고온초전도 전력기들을 개발하기 위해서는 극저온상에서의 DC 절연 특성과 같은 기초연구들이 선행 되어야 한다. 그러나, 지금까지 이 분야에 대한 연구가 많이 부족한 실정이다. 본 논문에서는 현재 초전도 전력기의 대표적인 절연 매질인 Kraft, Kapton(Polyimide)와 Nomax(Type 410)을 가지고 권선대 권선의 형상을 모의하여 DC와 AC의 절연파괴 특성의 차이점을 분석하였다. 실험의 결과로부터, 극저온상에서 각각의 절연매질에 따른 DC와 AC의 절연파괴 특성을 확인할 수 있었다.

#### 1. 서 론

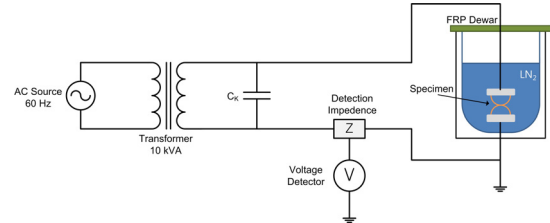
현재 고온 초전도 전력기기인 초전도 케이블, 초전도 변압기, 초전도 한류기 등의 설비들은 설계 및 상용화를 목전에 두고 있다. 고품질의 전력을 더욱 효율적인 방법으로 생산하여 공급하기 위해서는 기존 기술의 확대만으로는 부족하기 때문이다. 이러한 이유로 현재 전력 설비들은 신개념의 전력 공급 체계를 필요로 한다. 이에 따라 친환경적이고 소형화가 가능하며, 고효율의 운용이 가능한 고온 초전도 전력기기가 해결책으로 대두되고 있다. 그 중에서 고온 초전도 변압기는 절연수명의 손실 없이 과부하 용량의 증가와 효율의 향상이 가능하여 기존의 변압기와는 달리 구조물의 소형화로 공간 배치가 용이하고 환경 친화적 이어서 전력시스템 운용 전반에 걸쳐 많은 이점을 제공한다. 하지만, 이러한 이점에도 불구하고 AC전압이 인가되었을 때, 교류손실에 의한 심각한 효율의 감소는 불가피하다. 이에 따라 현재 고온 초전도 변압기의 교류손실에 대한 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 따라서, 교류손실로 인한 심각한 효율적 문제를 피하기 위해서는 DC고온초전도전력기들의 연구가 절실하다. 본 논문에서는 특히 고온초전도 변압기의 절연 설계를 위해 권선 대 권선의 형상을 모의하여 Kraft, Kapton(Polyimide)와 Nomax(Type 410) 절연지를 구리 도체에 감긴 턴 수에 따라서 절연파괴 실험을 DC와 AC에서 각각 실시하여 Weibull 절연파괴 확률분포도와 절연파괴의 범위를 나타내어 절연파괴 특성을 비교 분석하였다.

#### 2. 본 론

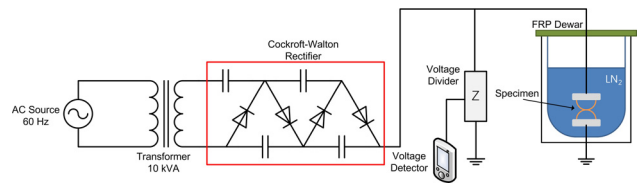
##### 2.1 실험 구성

Kraft, Kapton와 Nomax의 극저온상에서의 AC와 DC의 절연파괴 특성의 연구를 위한 실험장치의 개략도는 그림 1과 그림 2와 같다. 실험에 사용된 장비로는 Hipotronics사의 교류 내전압기(AC Dielectric TEST Set 7100-10/D149)와 정류회로를 이용하여 초당 상승 전압 3 kV/sec로 극저온상에서 각각 AC와 DC의 절연파괴 전압값을 측정하였다.

DC/AC 절연파괴(권선 대 권선) 실험을 위한 전극의 구성과 시료는 그림 3과 같다. 전극의 인가부(상판)와 접지부(하판)는 알루미늄으로 제작 되었으며 전극을 액체 질소에 함침 하였을 때 온도로 인해 미치는 물리적 영향을 최소화하기 위하여 상판과 하판을 지지하기 위한 지지대는 극저온상에서 절연특성 및 기계적 특성이 우수한 봉타입과 너트 타입의 GFRP(Glass Fiber-Reinforced Plastic)로 제작 하였다.



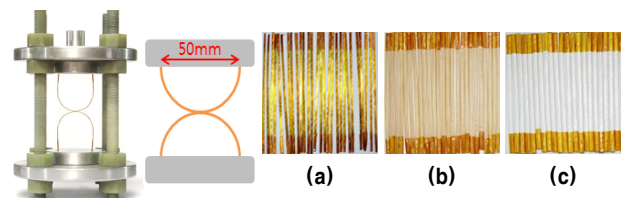
〈그림 1〉 AC 절연파괴 실험 다이어그램



〈그림 2〉 DC 절연파괴 실험 다이어그램

시료는 그림 3에 (a), (b), (c)와 같이 2 mm × 5 mm의 구리 권선에 50 μm × 10 mm의 준비된 절연지 Kapton, Kraft, Nomax를 상, 하층간에 10%가 겹치도록 하고 시료별로 1겹, 2겹, 3겹 까지 감아서 각각 10개씩 준비하였다. 또한 폴림 현상을 방지하기 위하여 절연지로 감겨진 구리권선의 상단부와 하단부에 접착성 Kapton Tape를 사용하여 마감을 하였다.

그림 3과 같이 제작된 전극에 준비한 시료를 권선대 권선의 형태로 결속하여 LN<sub>2</sub>상에서의 절연파괴 테스트를 하기위해 외함이 이중벽 구조로 이루어진 극저온용기를 이용하였으며, 전극의 함침 직후에 온도의 차이로 인하여 LN<sub>2</sub>에 기포가 발생할 경우 기포내의 기체층에 의한 방전경로 형성에 의해 절연파괴 값에 영향을 미칠 것을 고려하여 전압 인가 사이에 5분씩 안정화 시간을 두었다.

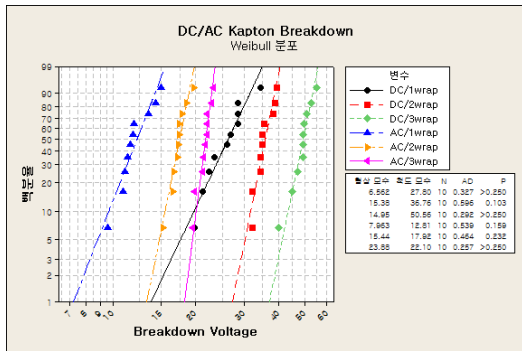


〈그림 3〉 권선대권선 전극 및 시료  
(a) Kapton (b) Kraft (c) Nomax

##### 2.2 실험 결과 2.2.1 Kapton

그림 4와 같이 절연파괴 전압 값을 Weibull 확률 그래프를 이용하여 나타낸 결과 Kapton 시료의 경우 절연지의 감긴 권수에 따라서 절연파괴 전압 값 이 증가하는 것을 확인을 할 수가 있다. 또한 같은 권수가 감긴 권선에서 DC의 절연파괴 전압 값이 AC의 절연파괴 전압 값보다 전체적으로 높은 값이 나오는 것을 확인 하였으며, Kapton 절연지를 1회 감은 권선에 DC전압을 인가하여

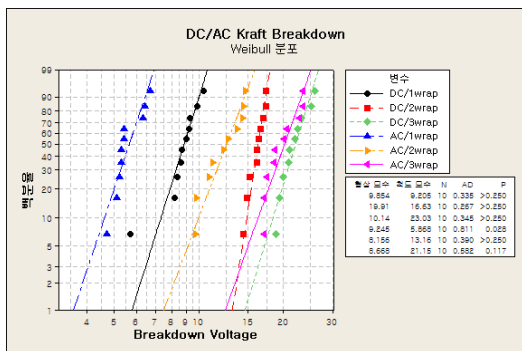
절연파괴 하였을 경우는 Kapton을 3회 감은 권선에 AC전압을 인가하였을 경우보다 Weibull 절연파괴 확률의 10 % 까지는 더 낮은 전압에서 절연파괴가 일어날 확률을 가진다는 것을 알 수 있었다.



〈그림 4〉 Kapton을 각각 1,2,3회 감은 권선의 DC,AC 절연파괴 Weibull분포

### 2.2.2 Kraft

그림 5에 따라 Kraft 절연지를 한번 감은 권선과 두 번 감은 권선까지 DC의 절연파괴 전압 값이 선형적으로 증가하였다는 것을 확인할 수 있었고 그 절연파괴 전압 값의 차이가 많게는 약 2배까지 높게 나온다는 것을 확인하였다. 하지만 Kraft 절연지를 세 번 감은 권선의 경우에는 DC와 AC의 절연파괴 전압 값의 차이가 다른 권수에 비해서 매우 적다는 것을 알 수 있었으며 두 번 감은 권선의 DC 절연파괴 전압 값 보다 3번 감은 권선의 AC절연파괴 전압 값 이 Weibull 확률의 3 % 까지 낮은 절연파괴 전압 값을 가진다는 것을 알 수 있다. 또한 Kraft를 감은 권선의 경우 Kapton과는 다르게, 같은 횟수가 감긴 권선에서는 DC의 절연파괴 전압 값이 AC전압 값 보다 오히려 높게 나오지만, 더 많은 횟수가 감긴 권선에서의 AC값이 DC절연파괴 전압 값 보다 높은 값을 가지는 것을 검증하였다.



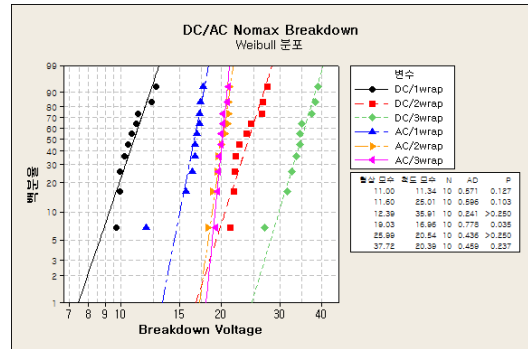
〈그림 5〉 Kraft를 각각 1,2,3회 감은 권선의 DC,AC 절연파괴 Weibull분포

### 2.2.3 Nomax

그림 6과 같이 Nomax 절연지를 감은 횟수에 따른 절연파괴 전압 값의 Weibull확률 추이를 보았을때 AC절연파괴 전압 값이 한 번 감은 권선과 두 번 감은 권선의 경우 거의 차이가 없다는 것을 확인할 수 있었고 DC의 경우 절연지를 감은 횟수가 많을수록 절연파괴 전압 값이 확연히 증가하였다는 것을 알 수 있었다. 다른 권선의 경우 같은 권수에서는 AC보다 DC의 절연파괴 전압 값이 높게 나오는 반면에 Nomax절연지를 한번 감은 권선에서는 절연파괴 전압 값이 AC에서 더 높은 값이 나오는 것을 알 수 있었다. 또한 두 번 감은 권선부터는 한번을 감은 권선에 비하여 매우 큰 절연파괴 전압 값을 가지고 세 번을 감은 권선의 절연파괴 전압 값이 두 번 감은 권선의 절연파괴 전압 값 보다 확연히 높은 값을 가진다는 것을 알 수 있었다. 마지막으로 Kapton이나 Kraft절연지를 감은 권선의 경우, 두 번 감은 권선과 세 번 감은 권선의 절연파괴 전압 값이 Nomax를 한번 감은 권선과 두 번 감은 권선의 절연파괴 전압 값에 비하여 매우 적은 값의 차이를 가진다는 것을 확인하였다.

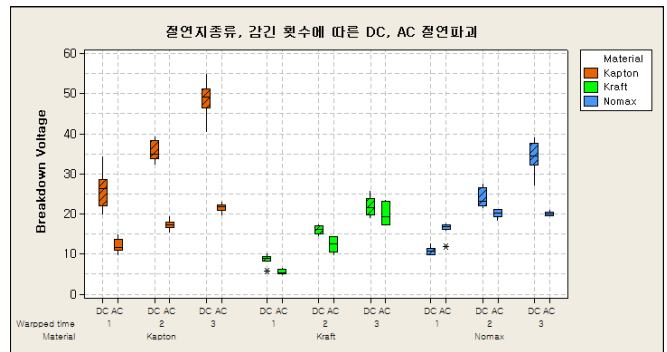
그림 7에서와 같이 Kapton절연지로 감은 권선의 절연파괴 전압 값은 절연지의 감긴 횟수에 따라 DC와 AC모두 매우 선형적으로

증가하였다는 것을 알 수 있었다.



〈그림 6〉 Nomax를 각각 1,2,3회 감은 권선의 DC,AC 절연파괴 Weibull분포

또한 Kapton의 경우, DC에서 같은 권수가 감긴 권선의 AC절연파괴 전압 값보다 약 2배정도 높게 나오는 것을 확인 하였다. Kraft가 감긴 권선의 경우도 권수가 증가 할수록 어느 정도 일정한 비율로 AC와 DC 모두 증가된 절연파괴 값을 가진다는 것을 알 수 있었고, 마지막으로 Nomax를 한번 감은 권선은 다른 절연지를 감은 권선과 달리 AC의 절연파괴 값이 DC의 절연파괴 값보다 높은 값의 절연파괴 값을 가지며 두 번 감은 권선과 세 번 감은 권선의 절연파괴 값은 다른 절연지가 감긴 권선들과 마찬가지로 절연파괴 전압 값이 DC에서 높은 값을 가진다는 것을 알 수 있었다. 특히 세 번 감은 권선의 DC절연파괴 전압 값은 같은 권수가 감긴 AC의 절연파괴 전압 값 보다 매우 높은 값을 가졌다.



〈그림 7〉 시료별(Kapton, Kraft, Nomax) 감긴 횟수에 따른 DC와 AC의 절연파괴 비교 그래프

## 3. 결 론

본 실험을 통하여 일반적으로 같은 조건의 절연매질에서는 DC가 AC보다 높은 값의 절연파괴 전압 값을 가지며, 감긴 권수와 절연지의 종류에 따라서 DC와 AC의 절연파괴 전압 값에 큰 차이가 있다는 것을 알 수 있었다. DC초고압고온초전도 전력기들의 상용화를 위해서는 신뢰성과 경제성을 필요로 한다. 그러한 점에서 AC와 DC의 극저온상에서 절연매질의 특성에 대한 연구는 실질적인 초전도 전력기기의 실용화를 위해 필수적이다. 앞으로 DC의 절연파괴 전압값이 AC보다 일반적으로 높은 값을 가지는 이유를 좀 더 확연히 규명하고 절연지가 감긴 횟수에 따른 효율성과 전력기들의 수명을 고려한 전기적 열화 및 열적 열화에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Lee, S.H., Seo, I.J. and Lee, B.W., "Assessments of Low-Temperature Aging Test Method for the Dielectric Materials Immersed in Liquid Nitrogen", IEEE Trans. Appl. Supercond., vol.20, p.1654 - 1657, 2010.
- [2] J.Gerhol and T. Tanaka, "Cryogenic electrical insulation of experience learned from metal superconductors to high critical temperature superconductors,"Cryogenic, vol.38, p. 1173 - 1188, 1998.