

극저온 환경을 고려한 기압별 N₂+SF₆, N₂+CF₄, N₂가스의 절연파괴 전압 값을 이용한 최대전계 분석

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

Analysis of the Maximum Electric Field for Changing Pressure using Breakdown Characteristic of N₂+SF₆, N₂+CF₄, N₂ Gases in a Cryogenic Environment

Seok-Ho Oh*, Sang-Hwa Lee, Woo-Ju Shin, Tae-Gun Park, Jae-Kyu Seong, Jae-Sang Hwang, Bang-Wook Lee*
Hanyang University*

Abstract - High voltage cryogenic insulation issues need to be addressed in order to promote the commercialization of high temperature superconducting (HTS) equipment. As a fundamental step in the development of the optimum bushings for HTS devices, the breakdown characteristics of liquid nitrogen mixed with liquefied insulating gases such as N₂, SF₆, and CF₄ have been investigated. In order to investigate the possibility of substituting CF₄ gas for SF₆ gas for the bushings of HTS electrical equipment, AC withstanding voltage tests have been performed. In this paper, finding the maximum electric field E_{max} using utilization factor η. This result is applicable to developing the real scale HTS equipment of the design parameters.

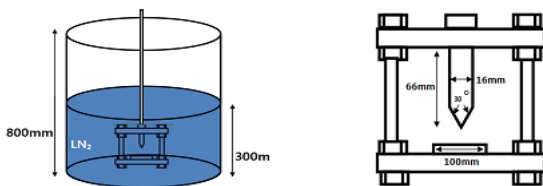
1. 서 론

전 세계적으로 초전도 전력기 연구 및 개발이 진행되고 있다[1]-[2]. 그러나 현재까지 송전선로를 위한 초전도 전력기는 상용화 되지 않았으며 그 중 극저온 고전압 절연 기술에 대해 완벽하게 규명되지 않았기 때문에 해결해야 할 과제로써 대두되고 있다. 초전도 전력설비 개발에 있어 가장 중요한 요소 중 하나는 초고압 대전류를 안정적으로 전력설비로 전달하는 극저온 부싱 개발로써 절연가스(N₂, SF₆, CF₄)와 LN₂의 혼합에 대한 절연파괴 특성을 연구하는 것이 매우 중요하다. 절연가스는 공기보다 절연 내력이 약 3배 좋고 아크 소호능력 또한 공기보다 약 100배 좋다. 특히 절연가스의 열 전달 효율은 공기에 비해 2배 이상 높기 때문에 아크 발생 시 발생하는 열을 쉽게 제거할 수 있다. SF₆가스는 상용화된 부싱 대부분에서 절연가스로 사용되고 있는데 다른 절연가스에 비해 액화온도가 낮아 극저온 상에서 결빙현상 발생으로 인하여 절연내력에 큰 영향을 주기 때문에 극저온 부싱의 절연가스로 바로 적용하기가 힘들다[3]. 본 연구에서는 극저온 60 kV급 부싱에서 N₂가스에 SF₆, CF₄가스를 각각 혼합하여 AC 내압기로 절연내력 평가를 수행하였고, 실험 결과 값을 최대전계 수식에 적용하여 시뮬레이션과 비교 및 분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험 구성

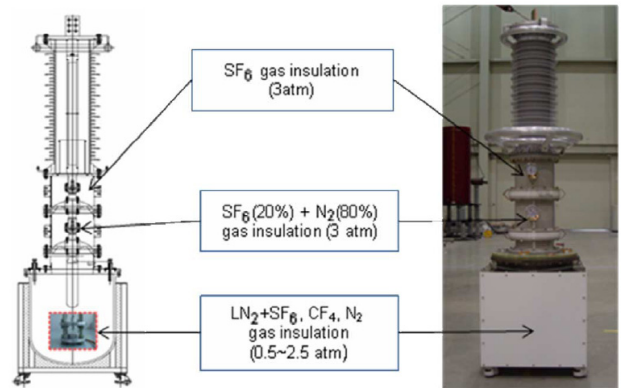
본 실험은 그림 2와 같이 60 kV급 부싱을 극저온 챔버에 체결하여 AC 내압기(400 kV/1 A)로 전압을 인가하였다. 그림 1은 불평등 전계 구조로써 침 전극의 반지름(r)은 0.35 mm, 평판의 직경은 100 mm로 사용하였고, 침-평판 전극의 거리(d)는 2 mm, 4 mm로 두고 LN₂에 침전시켰다. 그리고 극저온 챔버에는 그림 3과 같이 0.5 기압에서 2.5 기압까지 0.5 기압의 스텝을 주며 혼합가스의 압력을 올렸으며, 전압은 Up and Down 방식을 이용하여 10번씩 반복 실험을 하였다.



<그림 1> 시료의 위치 및 구성



<그림 2> AC테스트 구성



<그림 3> 극저온 챔버 및 60kV 부싱의 구성

2.2.1 수식을 이용한 최대전계 계산

LN₂에 침전된 침-평판 전극은 AC 내압기로 인가되었고 절연파괴 전압 값을 도출하였다. 여기에서 침 전극의 반지름은 r이고, 침-평판 전극의 거리는 d로 나타낼 때, 평균전계에 대한 최대 전계의 비율로 나타내는 전계 이용률 η 은 식(A)와 같이 나타낸다[4].

$$\eta = \frac{E_{mean}}{E_{max}} = \frac{\ln(\sqrt{p} + \sqrt{p-1})}{\sqrt{p(p-1)}} \dots (A)$$

여기에서 $p = \frac{d+r}{r}$ 은 전계 이용률 η에 대한 기하학적 특성이다.

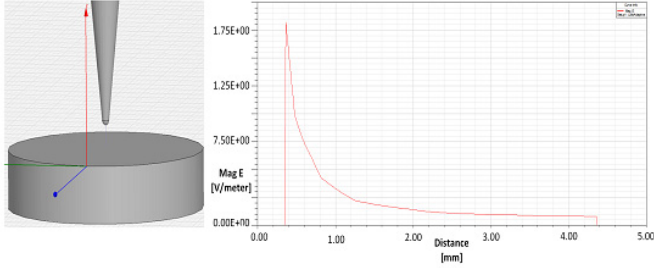
따라서 E_{max}는 다음 수식으로 계산이 된다.

$$E_{max} = \frac{V}{r\eta} = \frac{V}{r} \times \frac{\sqrt{p(p-1)}}{\ln(\sqrt{p} + \sqrt{p-1})} \dots (B)$$

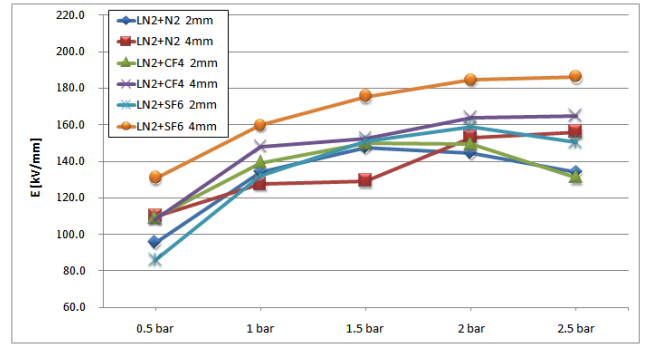
이 때, 우리가 실험에서 도출된 절연파괴 전압 V를 식 (B)에 대입하여 E_{max} 값을 구하였다.

2.2.2 시뮬레이션을 이용한 최대전계 계산

실험을 통해 얻은 절연파괴 전압 값을 식 (B)에 대입하여 최대전계 값을 구하였고 시뮬레이션 값과 비교하기 위해 MAXWELL 프로그램을 이용하여 침-평판 전극을 실제 크기에 맞추어 설계를 하였다. 각각에 들어가는 변수 값을 입력한 후 그림 4와 같이 최대전계 값을 그래프 (XY축)로 확인할 수 있었다. 전계가 가장 많이 집중된 곳은 침 전극과 평판 전극 사이 부분이었으며, 그곳을 중점으로 전계를 확인하였다.



<그림 4> 3D 시뮬레이션 설계(XY축) 및 결과



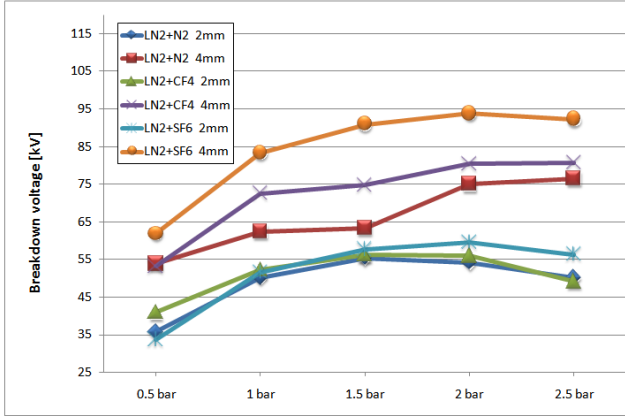
<그림 7> 시뮬레이션을 통한 최대전계 값

그림 6은 절연파괴 전압에 의한 값을 최대전계 계산식에 적용하여 구한 값을 그래프로 나타낸 것이며 그림 7은 시뮬레이션을 통해 구한 최대전계 값을 그래프로 나타낸 것이다. 이 두 그래프를 비교해보면 시뮬레이션을 통해 구한 최대전계 값이 수식을 통해 구한 값보다 약 20 % 더 높게 나온 것을 확인하였다.

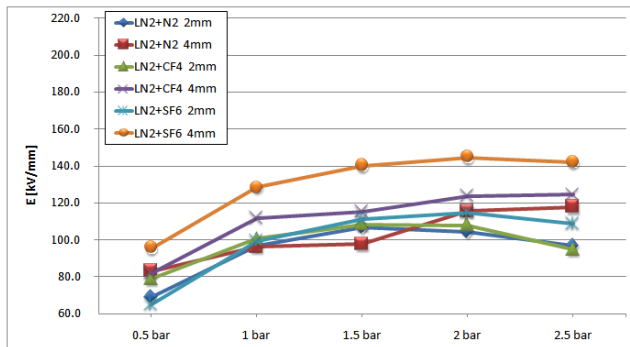
2.3 실험결과

그림 5는 시료를 LN₂에 침전시키고 SF₆, CF₄, N₂의 절연가스를 각각 혼합하여 AC 내압기로 인가했을 때의 절연파괴 전압 값을 나타낸 것이다. LN₂+SF₆와 LN₂+CF₄ 혼합 절연가스는 LN₂+N₂보다 절연내력이 2 %와 8 % 증가하였다. 침-평판 전극 사이 거리를 2 mm에서 4 mm로 증가시켰을 때, 절연파괴 전압 값은 증가하였다.

이러한 결과 값들은 압력과 전극 간격이 증가할수록 절연파괴 전압 값 역시 일정하게 증가하는 것으로 볼 때, Paschen's Law와 일치하는 것을 확인하였다. 그러나 2기압 이후의 실험에서는 절연파괴 전압 값이 감소하는 것을 확인하였으며 이러한 이유는 2기압 이후부터는 액화된 절연가스가 포화상태가 되면서 절연 내력을 떨어뜨리는 요인으로 사료된다.



<그림 5> LN₂ 환경에서 혼합가스들의 절연파괴 전압 값



<그림 6> 수식에 의한 최대전계 값

3. 결론

초전도 전력기기의 상용화를 위해 극저온 고전압 절연기술의 규명은 필수적이며 고온 초전도 전력기기 중 최적 부품을 설계하기 위해 극저온 환경을 고려한 혼합가스의 절연파괴 특성을 연구하였다. 본 연구는 60 kV급 부품을 극저온 챔버에 체결하여 불평등 전계 구조를 나타낸 침-평판 전극 시료를 LN₂에 침전시켜 SF₆, CF₄, N₂ 가스들을 혼합하여 AC 내전압을 인가해 절연 파괴 전압 값을 도출하였고, 그 값을 이용하여 기하학적인 구조에 따른 전계의 계산 및 절연체와 전계와의 관련성에 대해 연구하였다. 본 실험에서는 SF₆ 가스의 대체 가스로 고려되는 CF₄ 가스의 경우 절연파괴 전압 값과 최대전계 값은 약 10 % 낮게 나타난다는 것을 확인하였고, 이러한 값은 Paschen's Law에 대부분 일치한 결과라는 것을 확인하였다. 본 논문의 결과는 고온 초전도 전력기기를 설계할 때 고려해야 할 요소로서 적용할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 전력산업원천기술개발사업으로 수행된 연구성과입니다. (No. 2010T100100694)

[참고 문헌]

- [1] D. Haight, J. Daley, and P. Bakke *et al.*, "Overview of the U.S. Department of Energy (DOE) high-temperature superconductivity program for large-scale application," *Int. J. Appl. Ceram. Technol.*, vol.4, p.197-202, June 2007.
- [2] L. Xiao and L. Lin, "Recent progress of power application of superconductor in china," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol.17, no.2, p.2355 - 2360, June 2007.
- [3] F. Buret, "dielectric behavior in a high voltage circuit breaker at low temperature under lightning impulses," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol.11, no.1, p.267-273, Jan. 1996.
- [4] 김정태 "고전압 이론과 응용" 제4장 전계계산 p.63-64, 교우사