

이용률을 이용한 과냉질소 냉각시스템용 절연가스의 절연특성에 관한 연구

A Study on the Dielectric Characteristics of Insulation Gases for a Sub-cooled Liquid Nitrogen System

강형구^{1*}, 고태국²

Hyoungku Kang^{1*}, Tae Kuk Ko²

Abstract: A sub-cooled liquid nitrogen system is known as a promising method to develop high voltage superconducting apparatuses such as superconducting fault current limiters (SFCLs) and superconducting cables. To develop a high voltage superconducting machine adopting the sub-cooled liquid nitrogen system with a constant pressure, injecting a non-condensable gas is indispensable. In this study, the dielectric characteristics of insulation gases are investigated and analyzed by using electric utilization factors (ξ). It is found that the maximum electric field at sparkover that occurs with 50 % probability, $E_{MAX,50\%}$ exponentially decreases as the ξ increases. This means that the $E_{MAX,50\%}$ at sparkover can be estimated with the ξ only, without any other electrical insulation test. This result is applicable to developing the gas insulated high voltage superconducting electric power apparatuses.

Key Words: dielectric test, electrical breakdown, field utilization factor, high voltage superconducting machines, sub-cooled liquid nitrogen system.

1. 서 론

지난 2006년 12월, 연세대학교와 현대중공업의 공동연구를 통하여 세계 최초로 13.2 kV / 630 A 배전급 저항형 초전도한류기가 개발되었다. 이러한 초전도한류기를 포함한 고전압 초전도전력기기를 냉각하기 위한 방법으로는 과냉질소 냉각시스템이 주로 사용되고 있다. 일반적으로 과냉질소 냉각이란, GM 냉동기를 사용하여 액체질소의 온도를 64 K 이상 77 K 이하로 냉각하고 비응축기체를 주입하여 시스템 내 압력을 0.12 기압 이상으로 유지하는 방법을 의미한다 [1]. 이와 같은 과냉질소 냉각시스템의 장점으로서는 포화질소에 비하여 우수한 열전달 특성과 절연특성, 그리고 초전도선재의 임계전류특성 향상 등을 들 수 있다 [1]. 이와 같은 이유로 고전압 초전도 전력기기를 개발하기

위해서는 과냉질소 냉각시스템을 이용하는 것이 효과적인 것으로 알려져 있다 [2]. 액체질소에 대하여 비응축 특성을 가지는 기체로는 기체헬륨과 기체네온, 그리고 기체수소 등이 있으며, 현재 과냉질소 냉각시스템 개발에는 주로 기체헬륨이 사용되고 있다.

본 연구에서는 구 대 평판 전극을 이용하여 기체헬륨의 절연파괴전압을 측정하여 기체질소와 공기의 절연파괴전압과 비교하였다. 절연파괴실험은 다양한 구전극의 사이즈와 전극 간의 거리에 대하여 수행하였다. 특히, 실험을 통하여 얻은 절연파괴전압의 특성을 전계 이용률 (utilization factor, ξ)과 절연파괴 최대전계를 이용하여 분석하였다. 본 연구결과는 향후 과냉질소 냉각시스템을 이용한 모든 고전압 초전도전력기기의 절연설계에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 과냉질소 냉각시스템의 구조 및 절연특성

2.1. 과냉질소 냉각시스템의 구조

과냉질소 냉각시스템을 이용한 초전도한류기의 구조를 다음의 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 초전도코일은 GM-냉동기와 구리 재질의 써멀앵커에 연결되어 있으며 액체질소 내에 잠겨 있다. 전류도입선 포트와 신호선 포트 내에는 시스템 압력을 일정하게 유지하기 위하여 기체헬륨이 주입된다. 일반적으로 액체질소는 1 기압 이상의 압력에서 20 kV/mm 이상의 절연내력

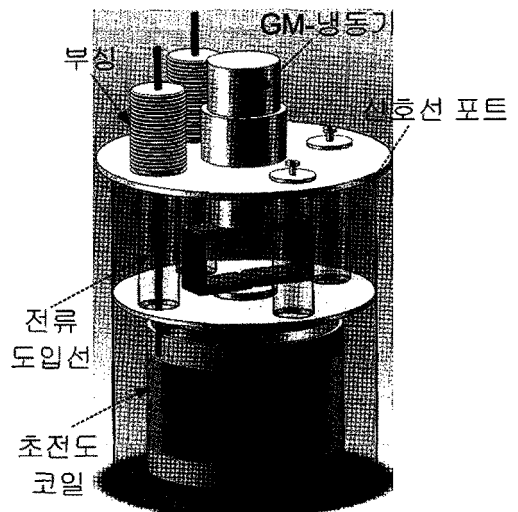


Fig. 1. A schematic sketch of a 13.2kV/630A resistive type SFCL.

¹정 회 원 : 충주대 첨단과학대 전기공학과 전임강사

²정 회 원 : 연세대 공과대 전기공학과 교수

*교신저자 : kang@cjnu.ac.kr

원고접수 : 2010년 01월 31일

심사완료 : 2010년 02월 17일

게재확정 : 2010년 02월 17일

특성을 가지지만, 기체헬륨의 절연파괴전압은 공기의 절연파괴전압에 비해 매우 작은 것으로 알려져 있다 [3]. 따라서 과냉질소 냉각시스템을 이용하는 고전압 초전도전력기기의 절연설계를 위해서는 전류도입선이 존재하는 기체헬륨부에서의 절연특성에 관한 연구가 필수적이다.

2.2. 전류도입선부의 절연특성

현대중공업과 연세대학교에 의하여 개발된 13.2 kV / 630 A급 저항형 초전도한류기의 전류도입선은 구리로 만들어졌으며, 구리 외부가 GFRP로 둘러싸인 구조를 가졌다. 그림 2는 구리도체와 GFRP의 위치 관계에 따른 전류도입선의 종류를 나타낸 것으로서, A type은 고체절연물이 없는 구리 나도체이고, B type은 구리도체와 GFRP 사이 간격이 없는 경우이며, C type은 일정한 간격을 두고 GFRP로 둘러싸인 경우를 나타낸다.

구리도체의 직경을 10 mm, GFRP의 두께, 구리도체와 GFRP 사이의 간격을 5 mm라고 가정하였다. 내경이 55 mm인 접지된 전류도입선 내부에 전류도입선을 위치시키고 1 kV의 전압을 인가하였을 때의 전계 분포를 그림 3에 나타내었다. 그림 3에 나타난 바와 같이 A type 구조와 같이 나도체에서의 최대전계는 6.24 kV / mm인데 반하여, B type과 같은 구리도체에 GFRP를 밀착한 구조에서의 최대전계는 3.13 kV / mm이고, 구리도체와 GFRP 사이에 간격이 존재하는 C type의 경우에는 최대전계가 8.51 kV / mm였다. 이와 같이 구리도체와 절연체인 GFRP 사이에 간격이 존재하는 경우에는 구리도체와 GFRP 사이의 기체에서 최대전계가 분포한다는 사실을 알 수 있다.

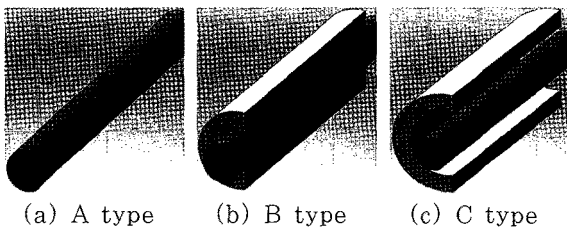


Fig. 2. Three kinds of a current lead.

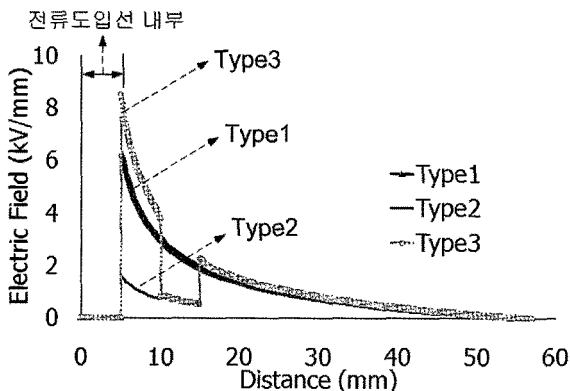


Fig. 3. Distribution of electric field according to current leads.

3. 전극시스템의 설계 및 제작

본 실험에는 침 대 평판전극시스템에 비하여 전극극기의 설계값과 실제값 차이에 따른 오차발생과 전극축의 기울어짐으로 인하여 발생하는 전계의 왜곡현상이 적은 구 대 평판 전극시스템을 설계, 제작하였다. 구 전극의 직경은 20 mm와 30 mm 두 종류로 하였으며, 평판전극의 직경은 120 mm, 평판전극의 모서리 부분 곡률반경은 5 mm로 결정하였다. 또한, 전극간의 거리는 25 mm, 45 mm, 그리고 65 mm로 설정하였다.

전계 이용률이란, 평균전계에 대한 최대전계의 비율로 나타내어지며 식 (1)과 같이 표현된다. 여기에서 E_{MAX}는 최대전계를 의미하며 E_{mean}은 평균전계를 의미한다.

$$\xi = \frac{E_{mean}}{E_{MAX}} \tag{1}$$

구 전극의 직경과 갭간격에 따른 전계 이용률값은 유한요소해석법을 이용하여 계산하였으며, 계산 결과를 표 1에 정리하였다. 표 1에서 보는 바와 같이 본 연구에서는 전계 이용률의 범위를 0.143에서 0.355 사이로 설정하였다. 그림 4는 AC 고전압 시험장치에 연결된 구 대 평판 전극 (구 전극 직경 20 mm, 갭간격 25 mm)의 모습을 나타낸 것이다.

Table 1. The field utilization factors according to the conditions of electrode systems.

구 전극 직경 (mm) \ 갭간격 (mm)	20	30
25	0.291	0.355
45	0.186	0.253
65	0.143	0.201

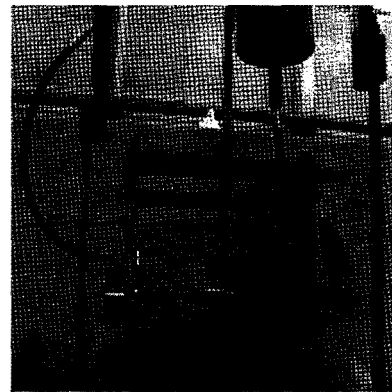


Fig. 4. A sphere-plane electrode system connected to a high voltage and a ground lead.

4. 절연파괴실험

4.1. 절연파괴실험 장비

송·배전용 전력기기의 절연특성평가를 위한 시험은 주로 뇌임펄스 절연파괴시험과 AC 절연파괴시험으로 나눌 수 있다. 본 연구에서는 전극시스템 사이에 60 Hz의 교류전압파형을 1 kV / s의 속도로 점차 상승시켜주다 절연파괴가 발생하는 전압을 기록하는 방식

으로 실험을 진행하였다. 절연파괴실험용 장비의 용량은 200 kV, 60 kVA으로서 구 전극의 끝은 마이크로미터와 연결하여 갭간격을 조절할 수 있도록 제작하였으며, 고전압을 인가하였다. 그리고 평판 전극은 전극지지대에 고정하고 접지선과 연결하였다.

4.2. 절연파괴실험 결과

일반적으로 기중에서 AC 전압에 의한 평등전계 사이에서의 절연파괴 전계는 다음의 식 (2)와 같다 [4].

$$E_{BD} = 24.05 \times \delta \times \left(1 + \frac{0.328}{\sqrt{\delta \times d}}\right) (kV/mm) \quad (2)$$

여기에서 δ 는 1 기압, 20 °C의 공기를 1로 하였을 때의 상대적 공기밀도를 나타내며, d 는 전극 간의 갭간격을 나타낸다. 그러나 평등전계가 아닌 준평등전계와 불평등전계 조건에서는 이와 같은 식이 알려져 있지 않다. 본 연구에서는 공기와 기체질소, 그리고 기체헬륨의 절연파괴특성과 전계 이용률이 가지는 관계를 살펴보았다. 이와 같은 절연파괴특성과 전계 이용률의 함수관계를 이용한다면, 실험을 수행하지 않고 유한요소해석법을 이용한 계산만을 통하여 기체 절연매질의 절연파괴전압값을 계산할 수 있을 것이다.

각 조건 당 동일한 실험을 12회씩 반복 수행하였으며, 최대값과 최소값을 제외한 10개의 실험 데이터 평균값을 절연파괴전압값으로 결정하였다. 구 전극의 직경이 20 mm인 경우, 절연파괴실험 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 공기와 기체질소의 절연파괴전압값은 갭간격과 무관하게 거의 동일하다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 공기의 80%가 기체질소로 이루어져 있기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 공기와 기체질소는 갭간격이 증가함에 따라 절연파괴전압은 서서히 포화하며 증가하는 경향을 가

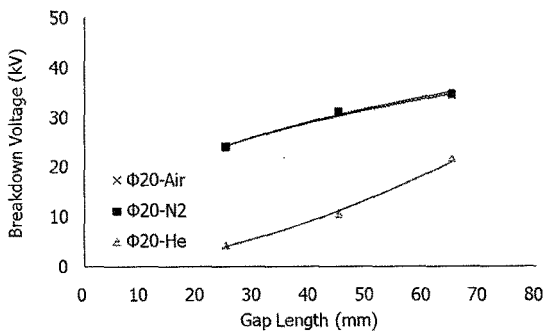


Fig. 5. Distribution of electrical breakdown voltage according to insulation gas (diameter: 20 mm).

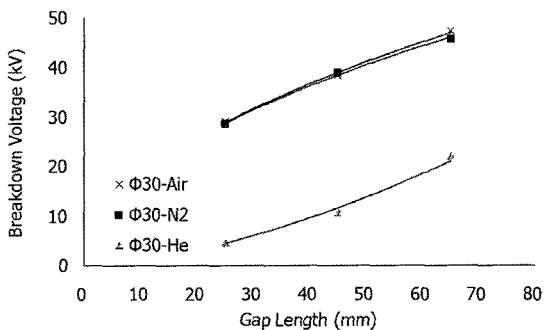


Fig. 6. Distribution of electrical breakdown voltage according to insulation gas (diameter: 30 mm).

진다. 그러나 기체헬륨의 절연파괴전압은 갭간격이 증가함에 따라 지수함수적으로 증가하지만 공기나 기체질소에 비하여 전압크기가 작다는 것을 확인할 수 있다. 그림 6은 구 전극의 직경이 30 mm인 경우, 갭간격 변화에 따른 절연파괴전압값을 나타내었다.

4.3. 절연파괴실험 결과분석

기체 절연매질의 절연파괴특성은 최대전계에 의하여 결정되며, 공기 중 (1기압, 상온)에서의 절연파괴 최대전계는 약 3 kV / mm로 알려져 있다 [5].

본 논문에서는 기체헬륨을 비롯한 공기, 기체질소 등의 절연파괴특성과 전계 이용률의 상관관계를 실험적으로 확인하는 연구를 수행하였다. 유한요소해석 시 구 전극에 1kV 전압을 입력했을 때 발생하는 최대전계값을 $E_{MAX,1kV}$ 라 하고 절연파괴전압의 평균값을 $V_{BD,50\%}$ 라 한다면, $E_{MAX,1kV}$ 와 $V_{BD,50\%}$ 의 곱은 $E_{BD,MAX,50\%}$ 로서 절연파괴 시 최대전계를 의미하게 된다. 다음의 표 2, 표 3, 표 4에는 공기와 기체질소, 그리고 기체헬륨에서의 전계해석과 절연파괴실험을 통하여 계산한 $E_{MAX,1kV}$ 와 $V_{BD,50\%}$, $E_{BD,MAX,50\%}$ 을 정리하였다. 다음의 그림 7에는 앞서 각 조건에 대하여 계산한 $E_{BD,MAX,50\%}$ 를 전계 이용률에 대하여 표시하였다. 공기와 기체질소, 그리고 기체헬륨의 절연파괴 최대전계값은 전계 이용률에 대한 함수로 나타낼 수 있음을 확인할 수 있다. 또한, 그림 7의 결과를 다음의 식 3~5와 같은 함수식으로 나타내었다.

공기와 기체질소의 절연파괴특성은 거의 동일하며 절연파괴 최대전계값은 3 kV / mm와 유사한 값을

$$E_{BD,MAX,50\%(air)} = 2.685 \times \xi^{-0.17} \quad (3)$$

$$E_{BD,MAX,50\%(GN_2)} = 2.636 \times \xi^{-0.18} \quad (4)$$

$$E_{BD,MAX,50\%(GHe)} = 0.076 \times \xi^{-1.78} \quad (5)$$

Table 2. The summary of calculated values of $E_{MAX,1kV}$, and $E_{BD,MAX,50\%}$ in case of air.

구 전극 직경 (mm)	20			30		
	갭간격 (mm)	25	45	65	25	45
$E_{MAX,1kV}$	0.138	0.120	0.108	0.113	0.088	0.076
$E_{BD,MAX,50\%}$	3.31	3.69	3.73	3.25	3.35	3.61

Table 3. The calculated values of $E_{BD,MAX,50\%}$ in case of GN_2 .

구 전극 직경 (mm)	20			30		
	갭간격 (mm)	25	45	65	25	45
$E_{BD,MAX,50\%}$	3.31	3.73	3.75	3.21	3.40	3.48

Table 4. The calculated values of $E_{BD,MAX,50\%}$ in case of GHe.

구 전극 직경 (mm)	20			30		
	갭간격 (mm)	25	45	65	25	45
$E_{BD,MAX,50\%}$	0.58	1.27	2.36	0.53	0.94	1.68

감사의 글

이 논문은 2007년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (R0A-2007-000-20063-0)

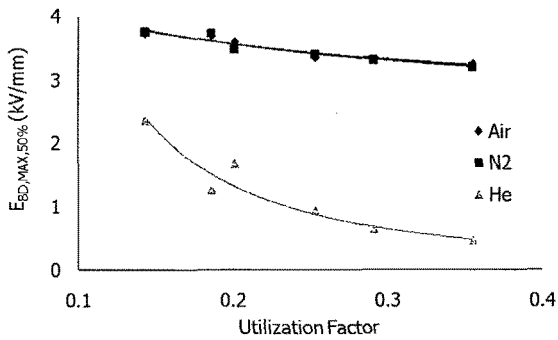


Fig. 7. Electric field distribution according to insulation gas.

가진다는 것을 확인할 수 있다. 기체헬륨은 전계 이용률이 증가함에 따라 절연파괴 시 최대전계값의 크기가 지수함수적으로 작아지는 것을 확인할 수 있다. 기체헬륨은 절연파괴 최대전계값이 전계 이용률의 크기에 따라 0.53 kV/mm에서 2.36 kV/mm 범위에 존재하는 것을 알 수 있다.

결과적으로 어떤 구조를 가지는 전극시스템이든 유한요소해석법을 이용하여 전계 이용률을 계산하면 그림 7과 식 (3)~(5)를 이용하여 절연파괴 시 최대전계값을 추정할 수 있고, 절연파괴 시 최대전계값을 이용하여 절연파괴전압을 계산할 수 있게 된다. 즉, 실험을 수행하지 않고도 유한요소해석법만으로 절연파괴전압을 산정할 수 있다. 절연파괴전압은 다음의 식 (6)을 이용하여 계산할 수 있다.

$$V_{BD,50\%} = \frac{E_{BD,MAX,50\%}}{E_{MAX,1kV}} \quad (6)$$

5. 결 론

초전도한류기와 같은 고전압 초전도전력기기를 개발하기 위해서는 일반적으로 과냉질소 냉각시스템이 사용된다. 이러한 과냉질소 냉각시스템의 압력을 일정하게 유지하기 위해서 기체헬륨을 주입하게 되며, 전류도입선은 기체헬륨부에 위치하게 된다. 본 논문에서는 전기 절연적으로 안정성이 우수한 전류도입선을 설계하기 위하여 기체헬륨의 절연내력특성을 공기와 기체질소에 대하여 비교, 분석하였다. 기체질소의 절연내력특성은 공기와 유사하였으며, 기체헬륨의 절연내력특성은 공기나 기체질소에 비하여 매우 낮은 것으로 나타났다. 공기와 질소, 그리고 헬륨과 같은 기체매질의 절연파괴특성은 절연파괴 시 최대전계의 크기에 의하여 결정되는데, 본 연구를 통하여 절연파괴 시 최대전계가 전계 이용률과 함수 관계를 가진다는 사실을 확인할 수 있었으며 함수식을 도출하였다. 이러한 절연파괴 시 최대전계와 전계 이용률 간의 함수식을 이용하면, 실험을 수행하지 않고도 임의의 전극시스템에서의 절연파괴전압을 정확하게 계산할 수 있을 것이다. 본 연구결과는 고전압 초전도전력기기 뿐만 아니라 일반 기체 절연방식을 사용하는 배전반이나 차단기에도 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Hyoungku Kang, Chanjoo Lee, Tae Kuk Ko, Bok-Yeol Seok, "Electrical Breakdown Characteristics of Superconducting Magnet System in Sub-cooled Liquid Nitrogen," IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 17, No. 2, pp.1509-1512, 2007.
- [2] Bok-Yeol Seok, Hyoungku Kang, Chanjoo Lee, Kwanwoo Nam, Yong-Han Kim, Tae Kuk Ko, "Electrical Breakdown Characteristics of Superconducting Magnet System in Sub-cooled Liquid Nitrogen," IEEE Trans. on Applied Supercond. vol. 17, No. 2, pp.1505-1508, 2007.
- [3] S. Chigusa, H. Maeda, Y. Taniguchi, N. Hayagawa, H. Okubo, "Breakdown characteristics of pressurized liquid helium under quench condition of superconducting wires", in Conference records of IEEE International Symposium on electrical Insulation, Virginia, USA, pp. 195-201, 1998.
- [4] 林泉, "고전압 플라즈마 공학," 동일출판사, 2003.
- [5] David K. Cheng, "Fundamentals of Engineering Electromagnetics," 반도출판사, 1995.

저 자 소 개



강형구(姜亨求)
 1973년 08월 04일생, 1997년 성균관대 공대 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 2005년 연세대 대학원 전기전자공학과 졸업(공학박사), 2005~2009년 현대중공업 선임연구원, 현재 충주대 전기공학과 전임강사.



고태국(高太國)
 1955년 07월 04일생, 1981년 연세대 전기공학과 졸업, 1983년 Case Western Reserve Univ. Dept. of EEAP 졸업(Ph. D), 1986~1988년 Ohio Cleveland State Univ. 전기공학과 조교수, 현재 연세대 전기전자공학부 정교수, 현재 한국초전도·저온공학회 회장.