

## 액체질소 절연파괴전압의 상관 분석

백승명<sup>a</sup>

창원문성대학 소방안전공학과

### Correlation Analysis of the Dielectric Breakdown Voltage of Liquid Nitrogen

Seung-Myeong Baek<sup>a</sup>

Department of Fire Safety Engineering, Changwon Moonsung University, Changwon 664-771, Korea

(Received April 30, 2015; Accepted May 7, 2015)

**Abstract:** We analyzed the correlation between breakdown voltage(BDV) of liquid nitrogen(LN2) and factors. The chosen factors affecting the breakdown are the diameter of electrode, gap length, temperature of LN2, and pressure of LN2. The BDV of LN2 was increased with increasing the diameter, the gap length and the pressure. And The BDV of LN2 was increased with decreasing the temperature. However, correlation coefficient was different from each other depending on the situation. The BDV exhibited a very high correlation coefficient of 0.92227 to dependence on the diameter. And a very high correlation coefficient of 0.94980 to dependence on the pressure under sphere(D 7.5 mm)-plane electrode. When the pressure is applied, sphere-plane electrode is the correlation coefficient was higher than that of the needle-plane electrode. It shows the dependence of a temperature coefficient of  $-0.758290 \sim -0.39946$  under needle-plane electrode.

**Keywords:** Correlation analysis, Breakdown voltage(BDV), Liquid nitrogen(LN2), Correlation coefficient

## 1. 서론

고온초전도체를 활용한 기기의 개발 연구가 활발히 진행되고 있으며, 한국전력에서 고온초전도 케이블의 실증시험을 성공적으로 실시하여 응용에 대한 기대감이 더욱 증가되었다 [1-3]. 고온초전도체의 초전도 현상을 나타내는 온도가 저온초전도체와 비교해 매우 높아졌지만 아직은 극저온 냉매를 활용해야 하고 극저온 냉매로는 액체질소가 대부분 사용되고 있기 때문에 액체질소의 절연 특성은 고온 초전도체의 전기적 절연

설계에 매우 중요한 요소이다. 고온초전도 케이블, 마그넷, 한류기, 변압기 등 전력계통에 응용을 위하여 다양한 환경에서 액체질소의 절연 특성을 연구하여 전기 절연설계에 응용하기 위한 연구가 진행되었다 [4-6]. 고온 초전도 기기는 응용되는 분야에 따라 구조가 다양하고 절연구성도 복잡하게 구성되어 있어 기기의 절연설계를 위해서는 절연 구성을 분석하고 액체질소의 절연 특성을 연구·분석하여 전기절연설계에 적용하게 된다. 하지만 성공적인 전기절연설계를 위해서는 고온 초전도 기기의 운전 조건과 환경에 따라 액체질소의 절연성능을 고찰해야 하고 이러한 과정은 고온 초전도 기기의 개발 및 발전을 지체하는 요인으로 작용되었다.

따라서 본 연구에서는 액체질소의 절연파괴에 미치는 중요한 인자인 전극면적, 전극 거리, 액체질소 압력과 온도 변화에 대하여 액체질소의 절연파괴전압을 측

a. Corresponding author; [smbaek@cmu.ac.kr](mailto:smbaek@cmu.ac.kr)

정하고 절연파괴 전압과 인자와의 상관관계를 분석함으로써 액체질소의 절연파괴전압과 인자의 관계를 조사하였다. 이는 향후 액체질소를 냉매로 사용하는 고온 초전도 기기의 전기절연설계에 적용 가능한 기본적인 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 실험 방법

액체질소의 절연파괴에 미치는 인자는 전극 직경, 전극 거리, 액체질소 압력과 온도 변화로 결정하였다. 전극 거리는 0 ~ 10 mm, 액체질소의 온도는 65 K ~ 77 K, 액체질소의 압력 변화는 0 ~ 5 MPa이다. 절연파괴전압을 측정하기 위하여 침, 구, 평판 전극을 이용하여 전극계를 구성하였다. 재질은 모두 스테인레스 스틸이고 침 전극은 침단 직경은 0.05 mm, 구 전극 직경은 7.5 mm와 17.5 mm를 사용하였다. 평판 전극의 직경은 80 mm이다. 침 전극과 구 전극에 고전압을 인가하여 절연파괴 시험을 실시하였다. 고전압 인가를 위해 BARU 사의 교류(60 Hz, 100 kV) 고전압 장치를 사용하였으며 절연파괴 발생까지 1 kV/sec의 속도로 전압을 상승시켰다. 절연파괴 전압 측정은 동일한 조건에서 5 ~ 10회 실시하였으며 매회 1분의 시간 간격을 두었다.

Table 1. Specifications electrode.

H.V. Electrode	Needle	Sphere	Plane
Diameter	0.05	7.5	17.5
Material	Stainless Steel		

### 2.1 상관관계 분석

상관분석은 변수들 간에 존재하는 선형 관련성의 정도를 측정하여 분석하는 방법이다. 이 때 선형 관련성의 정도를 측정하는 척도로는 상관계수(correlation coefficient)  $\rho$ 를 사용한다. 두 확률변수 X와 Y의 상관계수  $\rho$ 는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\rho = \frac{Cov(X, Y)}{\sqrt{Var(X)} \cdot \sqrt{Var(Y)}} \quad (1)$$

여기서,  $Cov(X, Y) = E(X - \mu_x)(Y - \mu_y)$ 는 X와 Y의 공분산(covariance)이라 하며 확률변수 X의 증감에 따라 확률변수 Y의 증감의 경향에 대한 척도이다. 공분산 값을 각 변수의 표준편차들로 나누어 그 값의 범위를 -1에서 1사이로 오도록 스케일한 것이 상관계수  $\rho$ 이며 이 값은 X와 Y의 선형관계에 대한 강도를 나타내는 척도이다.

모상관계수가  $\rho$ 인 이변량 분포에서  $n$ 개의 표본  $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$ 을 얻었을 때, 상관계수  $\rho$ 는 표본으로부터 다음과 같이 추정한다.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (2)$$

$r$ 을 표본상관계수(sample correlation coefficient) 또는 pearson의 적률상관계수라고 부르며,  $-1 \leq r \leq 1$ 을 만족한다.  $r$ 이 1에 가까울수록 양의 상관관계가 강함을 시사하고,  $r$ 이 -1에 가까울수록 음의 상관관계가 강함을 시사한다. 본 실험에서 상관계수의 분석근거를 표 2에 나타낸다. '0.0~0.2 거의 없다. 0.2~0.4 낮다. 0.4~0.7 다소 높다. 0.7~0.9 높다. 0.9~1.0 아주 높다.'로 분석하였다.

Table 2. Determined based on the correlation coefficient.

Correlation	Correlation coefficient	Analysis
Positive correlation	0.9 ~ 1	Very high
	0.7 ~ 0.9	High
	0.4 ~ 0.7	A little high
	0.2 ~ 0.4	Low
	0.0 ~ 0.2	Hardly
Negative correlation	0.1 ~ -0.2	Hardly
	-0.2 ~ -0.4	Low
	-0.4 ~ -0.7	A little high
	-0.7 ~ -0.9	High
	-0.9 ~ -1	Very high

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 절연파괴 경향

그림 1에 전극 간격과 전극의 직경의 변화에 따른 절연 파괴전압을 나타낸다. 침 전극의 경우 전극 간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압의 증가는 완만하였으나, 구 전극은 급격히 증가하였다. 특히 구 전극의 직경이 커짐에 따라 증가 폭은 더욱 증가하였다. 즉, 전극의 직경이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 급격히 증가하는 것을 알 수 있다.

그림 2에 전극 간격 변화와 액체질소의 온도 변화에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 그림에서 나타나듯이 전극 간격이 증가함에 따라 어느 온도에도 절연파괴 전압은 증가하지만 전극 간격이 일정한 경우 온도 변화에 따른 절연 파괴 전압은 크게 높아지지 않았다. 즉 전계 불평등이 높은 침 전극에서는 액체질소의 온도가 낮아지더라도 액체질소의 절연내역 상승을 크게 기대할 수 없음을 알 수 있다.

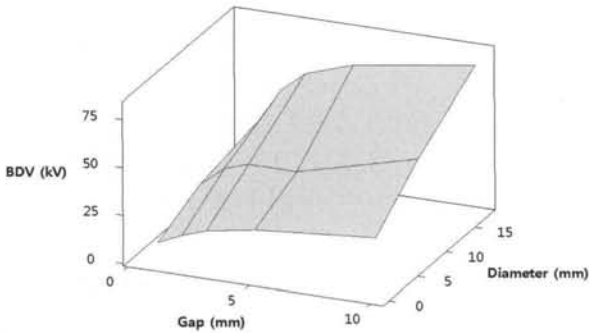


Fig. 1. The breakdown voltage vs. the electrode gap and diameter.

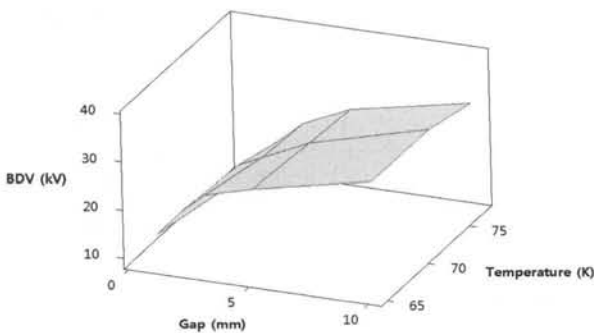


Fig. 2. The breakdown voltage vs. the electrode gap and temperature in needle-plane electrode.

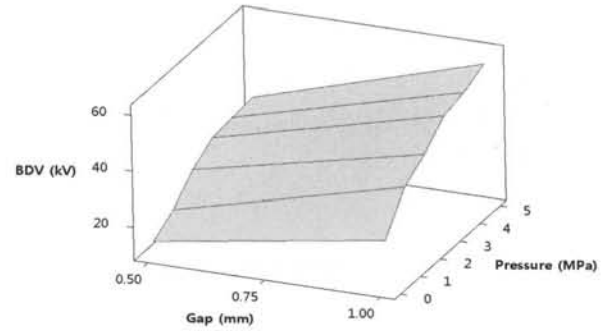


Fig. 3. The breakdown voltage vs. the electrode gap and pressure in sphere(D 7.5 mm)-plane electrode.

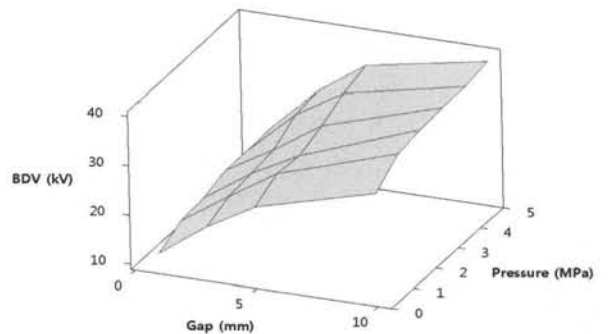


Fig. 4. The breakdown voltage vs. the electrode gap and pressure in needle-plane electrode.

그림 3에 구(직경 7.5 mm)-평판, 그림 4에 침-평판 전극계에서 전극 간격과 압력의 증가에 따른 절연파괴 전압을 나타낸다. 그림 3에 보이듯이 구-평판 전극계에서 전극 거리가 높아짐에 따라 절연파괴 전압이 상상하고 액체질소의 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전압이 급격히 상승함을 알 수 있다. 하지만 그림 4에서와 같이 침-평판 전극계에서는 전극 간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하지만 압력이 증가함에 따라 절연파괴 전압의 상승폭은 크지 않음을 알 수 있다.

#### 3.2 절연파괴전압 상관분석

표 3에 그림 1에서 4까지 나타낸 각 변수와 절연 파괴전압의 상관분석 결과를 나타낸다. 전극 직경에 따른 상관관계를 분석한 결과 침-평판 전극계의 상관계수 0.89652로 높은 관계를 나타내고, 구(직경 7.5 mm)-평판 전극계는 0.92227로 아주 높음으로 나타났다.

**Table 3.** Results of the correlation analysis.

Factor	Electrode system	Correlation	Gap length (mm)	Correlation coefficient.	Analysis
Diameter	Needle(D 0.05 mm)-plane	Positive correlation	1, 2, 3, 5, 10	0.89652	High
	Sphere(D 7.5 mm)-plane			0.92227	Very high
	Sphere(D 17.5 mm)-plane			0.86467	High
Temperature	Needle(D 0.05 mm)-plane	Negative correlation	1	-0.758290	High
			3	-0.63920	A little high
			5	-0.40732	A little high
			10	-0.39946	Low
Pressure	Needle(D 0.05 mm)-plane	Positive correlation	1	0.76666	High
			3	0.81873	High
			5	0.81779	High
			10	0.66324	A little high
	Sphere(D 7.5 mm)-plane	Positive correlation	0.5	0.92338	Very high
			1	0.94980	Very high

액체질소의 온도 변화에 따른 절연파괴전압은 상관관계를 분석한 결과 음의 상관관계를 나타냈으며, 전극 간격 1 mm에서 상관계수 -0.758290로 높은 관계를 나타내었지만 3~5 mm에서는 다소 높은 관계를 나타내었다. 10 mm에서는 낮은 관계를 나타내었다. 즉, 전극 간격이 멀어짐에 따라 절연파괴전압과 온도의 관계는 낮아지는 것으로 나타났다.

액체질소의 압력 변화에 따른 절연파괴전압의 상관관계를 침-평판, 구(직경 7.5 mm)-평판 전극계를 사용하여 분석하였다. 침-평판 전극계에서 5 mm까지 0.76666, 0.81873, 0.81779로 높은 관계를 나타내었으며, 10 mm에서는 다소 높은 관계를 나타내었다. 구(직경 7.5 mm)-평판 전극계에서는 0.5 mm에서 0.92338, 1 mm에서 0.94980로 아주 높은 관계를 나타내었다.

#### 4. 결론

액체질소의 절연파괴전압과 절연파괴에 영향을 미치는 인자와의 상관관계를 분석하기 위해 절연파괴에 영향을 미치는 인자를 선택하고 인자에 따른 절연파괴전압을 측정 후 상관관계를 분석하였다.

액체질소의 절연파괴에 영향을 미치는 인자로 선택한 것은 전극 간격과 직경, 액체질소의 압력, 및 온도이고, 전극 간격과 직경이 커질수록 액체질소의 압력이 높아질수록 액체질소의 온도는 낮아질수록 절연파괴전압은 높게 나타났다. 절연파괴전압과 전극 직경, 액체질소 압력은 양의 관계를 가지며, 액체질소의 온도에

는 음의 관계를 나타내었다. 전극 직경에 따른 상관계수는 높음, 매우 높음의 관계로 절연파괴 전압은 전극의 직경과 매우 관계가 높음을 알 수 있다. 액체질소의 온도에 따른 상관계수는 높음과 다소 낮음의 관계를 나타내었다. 즉 불평등 전계에서는 절연파괴 전압과 온도 관계는 낮음을 알 수 있다. 액체질소의 압력에 따른 상관계수는 침-평판 전극계에서 높음, 다소 높음의 관계를 나타내었지만 구-평판 전극계에서 아주 높음 관계를 나타내어 불평등 전계의 완화가 필요한 것으로 판단된다.

본 연구에서 액체질소의 절연파괴전압에 미치는 인자와의 상관관계를 명확히 하였으며 향후 고온초전도 기기의 전기절연설계에 유용한 자료로 활용될 것으로 판단된다.

#### REFERENCES

- [1] S. H. Sohn, J. H. Lim, B. M. Yang, S. K. Lee, H. M. Jang, Y. H. Kim, H. S. Yang, D. L. Kim, H. R. Kim, S. W. Yim, Y. J. Won, and S. D. Hwang, *Physica C: Superconductivity*, **470**, 1567 (2010).
- [2] M. Ohya, H. Yumura, T. Masuda, N. Amemiya, A. Ishiyama, and T. Ohkuma, *Physica C: Superconductivity*, **471**, 1279 (2011).
- [3] S. Lee, J. Yoon, B. Lee, and B. Yang, *Physica C: Superconductivity*, **471**, 1283 (2011).
- [4] J. Gerhold, *Cryogenics*, **38**, 1063 (1998).
- [5] M. Blaz and M. Kurrat, *Physica Procedia*, **36**, 1330 (2012).
- [6] S. M. Baek, J. M. Jung, and S. H. Kim, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **15**, 985 (2002).