

시뮬레이션을 통한 스파크갭의 SF₆, N₂ 압력 특성 분석

최순호¹, 이태우¹, 방정주¹, 허창수^{1,a}

¹ 인하대학교 전기공학과

Analysis of SF₆, N₂ Pressure Characteristic of Spark Gap According to Simulation

Sun-Ho Choi¹, Tae-Woo Lee¹, Jeong-Ju Bang¹, and Chang-Su Huh^{1,a}

¹ Department of Electrical Engineering, Inha University, Incheon 402-751, Korea

(Received January 2, 2014; Revised February 24, 2014; Accepted February 24, 2014)

Abstract: Industrial, medical, environment and agriculture application of pulse power technology have been developing rapidly in many field. In order to make use in the form of pulses is applied to the pulse forming technique. At this time, spark gap is generally used for the pulse forming. Spark gap may be possible to simulate the shape of the electrode, to know the uniform or non-uniform electric field of the electrode structure. Further, it can be determined using Paschen's law applied pressure of the insulating gas in accordance with the voltage which is created using the value of the electric field. In this paper, we tried to found using a formula and the simulation process to determine the pressure. The value of the electric field is different according to the shape of the electrode. So, the range of pressure applied also varies. In order to withstand the 100 kV with a gap of 5 mm, the nitrogen gas must be applied to about 7 bar in the electrode structure. On the other hand, in the same conditions, Sulfur hexafluoride gas must be applied to about 2 bar. Consequently, the Sulfur hexafluoride gas has a higher insulation properties than nitrogen gas may be applied to low pressure at the same conditions.

Keywords: Spark gap, Pressure characteristic, Paschen's law, Electric field utilization factor

1. 서론

펄스파워는 일정한 시간 동안 펄스를 충전하여 축적에너지를 만들고 축적된 에너지를 단시간에 방출함으로써 많은 양의 에너지를 얻는 것을 목적으로 한다. 펄스파워 발생이론을 근거하여 축적된 에너지도 적절한 고속 스위치를 통해 용도에 맞는 펄스를 발생

시키고 국방 분야뿐만 아니라 산업, 의료, 환경, 농업 분야에 펄스전원 장치가 사용되고 있다 [1]. 용도에 맞는 펄스의 형태를 만들기 위해서는 펄스 성형기술이 사용되고 이때 일반적으로 사용되는 장치가 스파크갭 (spark gap)이다. 스파크갭은 매우 빠른 형태의 상승시간을 (수백 ps) 가지는 펄스를 제작하기 위해 사용하는 고전압 스파크갭 스위치이다 [2]. 스파크갭의 형태는 사용 용도에 따라 전극의 형상을 설계할 수 있고 설계에 따라 자가 방전 또는 스위치를 통해 동작한다. 스파크갭에 사용되는 절연체는 구하기 쉽고 사용이 편리하며, 신뢰성이 높은 기체를 사용한다. 스파크갭의 상승시간 조절은 일차적으로 기체 압력과

a. Corresponding author; cshuh@inha.ac.kr

갭 간격에 의해서 조절할 수 있다. 하지만 스파크갭에 영향을 미치는 타 인자 (내부 인덕턴스, 갭 소재 등)도 존재하므로 타 인자를 변화가 일어나지 않게 안정시킨다면 일차적 요건인 기체압력과 갭 간격이 주요 인자가 된다.

본 논문에서는 구조적으로 설계된 스파크갭의 구조를 전자계 시뮬레이션에 적용함으로써 구조와 갭 간격에 따른 전계 분석을 하였다. 이 결과를 바탕으로 전극의 설계에서 평등전계 여부를 확인할 수 있는 전계이용률을 산출하였다. 또한, 시뮬레이션에서 구해진 전계 값을 사용하여, 절연기체의 종류에 따라 파센법칙을 사용하여 스파크갭에 인가하여야 하는 압력 범위를 예상하였다.

2. 실험 방법

2.1 관련 이론 및 실험 방법

2.1.1 전극 간격 변화에 따른 전계 분석

시뮬레이션을 진행하기 위해서 적용한 도면 샘플은 그림 1과 같이 국방과학연구소 (ADD)에서 출원 등록된 특허 (10-2009-0004284, 초광대역 강전자기와 복사용 스파크 갭 스위치 모듈)의 대표 도면을 사용하였다. 특허의 스파크갭을 바탕으로 변화하는 전계분포를 분석하였고, 전계 해석에는 Fulx 2D 시뮬레이션 프로그램을 사용하여 진행하였다.

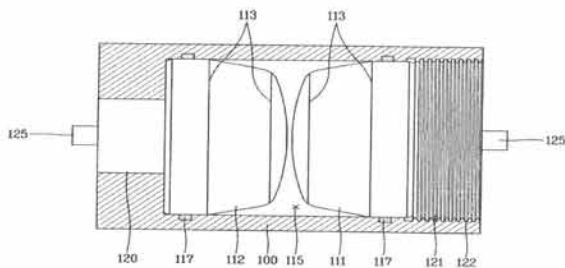


Fig. 1. Patent drawing of spark gap.

전극의 형상을 바탕으로 전극 간격을 달리하고 (5 mm, 10 mm, 14 mm) 인가전압을 100 kV를 가했을 경우 시뮬레이션 결과는 그림 2~4와 같다. 전계 분포를 분석하면 전극의 설계 형상에 따라 전극의 중심부에서

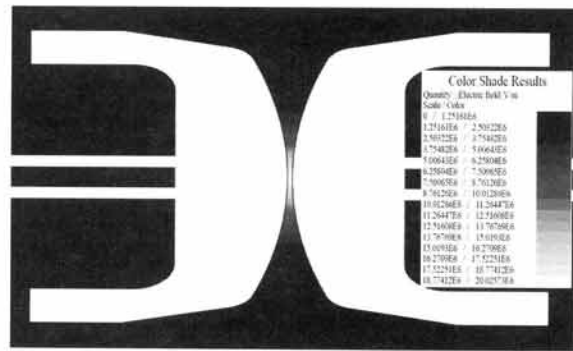


Fig. 2. Simulation of spark gap (gap 5 mm, applied voltage 100 kV).

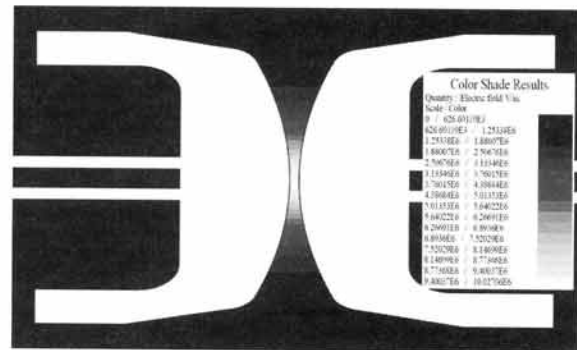


Fig. 3. Simulation of spark gap (gap 10 mm, applied voltage 100 kV).

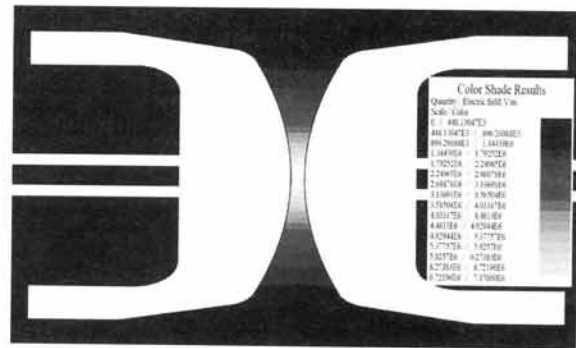


Fig. 4. Simulation of spark gap (gap 14 mm, applied voltage 100 kV).

가장 전계가 집중되고, 중심부에서 외부로 갈수록 전계의 집중 정도는 점차 감소하는 것을 알 수 있다. 전극의 간격에 따른 변화에서는 간격이 커질수록 전계 값이 감소하는데 이런 이유는 전계는 거리에 반비

레 ($E = V/d$) 하기 때문이다. 결과치를 확인하면 수치상으로 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 전자계 시뮬레이션은 전극의 형상에 따른 전계의 집중 정도를 알아볼 수 있기 때문에 개선된 방향으로 전극의 재설계가 가능하다. 전극의 형상이 특수한 용도가 아니면 최대한 평등전계를 이루는 것이 유리하므로 분포되는 전계 값을 통해 전계 이용률이라는 수치적인 분석을 통해 평등·불평등 전계를 알아볼 수 있다.

실험 결과에서 전극 간격 5 mm, 인가전압 100 kV에서 전극 중심부에서 20.03 kV/mm, 전극 간격 10 mm에서는 10.02 kV/mm, 전극 간격 14 mm에서는 7.17 kV/mm의 전계가 집중되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 시뮬레이션 통한 전극 근처에서의 계산되는 최대 전계 값을 통하여 전극에 가해야 하는 기체의 압력 값은 파센법칙을 통해 유도할 수 있다.

2.2 파센법칙 (Paschen's law)

기체의 파괴전압을 알기 위해서는 기체의 압력 (P)과 전극 간의 거리 (d)의 변화에 따라 파괴전압의 예측이 가능한 파센법칙을 적용할 필요성이 있다. E. Husain and R. S. Nema [3]의 연구 자료에서 제시한 파괴전압 (V_B)은 식 (2.1)과 같다.

$$V_B = \frac{BPd}{\ln(Pd) + k} \quad (2.1)$$

여기서 k 값은 기체에 따른 방전 메커니즘에 따라 도출된 값은 표 1과 같고, B 값은 표 2와 같다.

Table 1. Computed k as a function of pd [3].

GAS	Pd $kPa \cdot cm$	k
N ₂	0.0313 ~ 3	$2.5819(pd)^{-0.0514}$
	3 ~ 100	$2.4043(pd)^{0.1030}$
	100 ~ 1400	3.8636 [Corresponding to $pd = 100 kPa \cdot cm$ in $k = 2.4043(pd)^{0.1030}$]
SF ₆	0.3 ~ 3	$\ln[4.1227(pd)^{-0.4331}]$
	3 ~ 1200	$\ln[6.4541(pd)^{-0.8374}]$

Table 2. Value of constant B for different gases [3].

Gas	$B, V/kPa \cdot cm$
N ₂	2565
SF ₆	2189.25

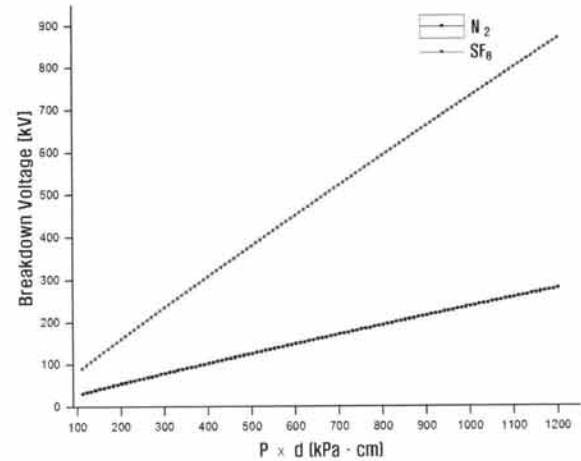


Fig. 5. Breakdown voltage corresponding to the value of $P \times d$ of N₂, SF₆.

연구자가 제시한 공식을 사용하여 스파크갭에 대한 압력과 갭 간격으로 고려하여 Pd 값 110~1,200까지의 N₂, SF₆의 파괴전압 변화는 그림 5와 같다. Pd 값이 작은 영역에서는 Pd 의 증가에 더불어 감소하고, 일정 Pd 값에서 최소 파괴전압을 $V_{B(\min)}$ 이 나타낸다. 하지만, 그림 5와 같이 본 논문에서 적용하는 범위 ($Pd = 110 \sim 1,200$)에서는 Pd 값이 증가함에 따라서 파괴전압이 직선적으로 증가하는 것을 알 수 있다. 또한, N₂보다 상대적으로 절연내력 특성이 좋은 SF₆의 경우에는 파괴전압 역시 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 본 연구의 결과가 신뢰성이 있는지 여부를 검증하기 위해서는 같은 조건으로 실험하고 결과를 도출한 논문을 통해 신뢰 여부를 판단할 수 있다 [4].

2.3 전계이용률을 통한 분석

전계는 절연물의 방전현상에 가장 중요한 역할을 하며 전계에 대한 수치적인 분석을 할 경우에는 전계 이용률 (electric field utilization factor)에 따라서 결

Table 3. Discharge process according to electric field.

Electric field	Increase of voltage(electric field)
Uniform & Quasi-uniform electric field	dark current → flashover
Non-uniform electric field	dark current → corona discharge → flashover corona discharge → leader → flashover

정한다. 전계는 전극의 설계 및 배치에 관계되어 변화되기 때문에 전계이용률 (ξ) [5-8]은 전극배치와 전계분포의 대표적인 파라미터라고 할 수 있다. 전계이용률 (ξ)는 평균전계 (E_{mean})와 최대전계 (E_{max})의 비로서 식 (2.2)으로 구할 수 있다.

$$\xi = E_{mean} / E_{max} \quad (2.2)$$

전극의 형상이 거의 비슷한 경우에는 전계이용률 (ξ)은 동일하고 전압에 의존하지 않으며, 전극의 형상과 배치로 결정되고 간단한 계산으로 구할 수 있다. 수치상으로 완전 평등전계일 경우 전계이용률 (ξ)은 1이며 평등전계에서 불평등전계로 전계분포가 변화할 경우에 1보다 작은 값이 된다. 또한, 평등전계와 불평등전계의 경계 정도는 약 0.8 이하를 불평등 전계로 본다. 여기서 전계이용률의 역수인 $1/\xi$ 는 전계집중계수 (electric field enhancement factor)라 한다. 전극의 배치와 방전의 형태는 전계를 이루는 상태 (평등전계, 준평등전계, 불평등전계 (장갑))에 따라서 방전 현상 과정이 변화한다.

섬락 (불꽃방전)은 평등전계 또는 준평등전계인 전극 배치에서 일어나고 암류에서 갑자기 전극 간에 도통 (도전) 상태로 되는 것을 말한다. 코로나 방전은 불평등 전계인 경우에 빛이나 소리를 수반하는 방전이 발생하는 것이다. 불평등전계에서 수반되는 코로나 방전의 문제는 선로에 노이즈가 발생하고 사용한 재료에 문제를 발생시켜 수명이 단축되는 단점을 지니고 있다. 이러한 이유로 특수한 용도로 스파크갭을 설계하지 않는 이상 최대한 준평등전계 이상의 높은 전계이용률을 가지도록 구조 설계를 하는 것이 중요하다.

3. 결과 및 고찰

3.1 절연기체의 인가 압력 범위

전극 간격에 따라서 시뮬레이션을 진행한 결과 그림 2~4와 같은 결과를 도출했다. 전극 간격 5 mm에서는 최대 전계는 20.03 kV/mm으로 전극의 간격을 고려한다면 최대로 전계가 집중되는 곳의 파괴전압은 약 100.15 [kV]이다. 절연기체를 질소를 사용할 경우에는 식 (2.1)을 적용하여 질소압력을 식 (3.1)과 같이 구할 수 있다. 식에서 $P \times d$ 의 단위는 $kPa \times cm$ 이기 때문에 단위를 주의하여 값을 대입하여야 한다.

$$100150 = \frac{2565 \times 0.5 P}{\ln(0.5 P) + 3.8636} \quad (3.1)$$

식 (3.1)을 계산하면 결과 값은 약 766.2 kPa (=7.662 bar)이고, 5 mm 간격에서의 100 kV를 견디기 위해서는 상기 계산된 것과 같이 질소의 압력을 인가 해주어야 한다. 최대전계가 집중되는 경우에 다른 인자에 의해서 계산보다 낮은 파괴전압에서 방전현상이 발생한다면 10% 정도의 파괴전압에 대한 여유를 줄 수 있고, 그 결과 851 kPa (= 8.51 bar)로 압력을 높여야 한다. SF₆ 같은 방식으로 인가압력 범위를 구할 수 있으며 전극 5 mm 간격에서의 값은 식 (3.2)와 같이 대입할 수 있다.

$$100150 = \frac{2189.25 \times 0.5 P}{\ln(0.5 P) + \ln[6.4541(0.5 P)^{-0.8374}]} \quad (3.2)$$

SF₆에 대한 대입 식 (3.2)을 계산하면 결과 값은 241.9 kPa (=2.41 bar)이 도출되고, 10%의 파괴전압에 대한 여유를 주었을 경우에는 267.8 kPa (= 2.678 bar)가 계산된다. SF₆의 경우에는 질소에 비해 높은 절연 특성을 가지기 때문에 같은 조건에서도 낮은 압력을 가해도 된다. 하지만 SF₆는 상온에서 질소에 비해 낮은 압력 범위에서 액화가 일어나기 때문에 적절한 용도에 맞춰 사용하여야 한다. 이처럼 절연기체의 인가 예상 압력 범위를 구한다는 것은 실험 장비 제작, 구성에 있어 실험 용기의 재질, 압력 인가 장비 등과 같이 압력에 맞춰 충족하는 실험 장치를 빠르게 구축할 수 있는 장점을 가진다. 또한, 실험 조건과 압

력 조건에 따라 파괴전압을 예측할 수 있어 연구자가 원하는 결과 도출에 있어 단시간에 스파크갭의 설계를 완성할 수 있다.

3.2 전극의 전계 이용률

그림 2~4와의 전계분포 그래프에서 전계가 집중되는 전극 중심부를 기준으로 Y축으로 전극 상단부 부터 하단부까지 전계분포를 분석하면 그림 6과 같고 전극 간격이 가까워질수록 전계분포 변화 정도가 급격하게 변하는 것을 확인할 수 있다. 앞서 제시한 식 (2.2)을 사용하여 전계이용률을 계산한다면, 표 4와 같은 결과를 도출할 수 있다.

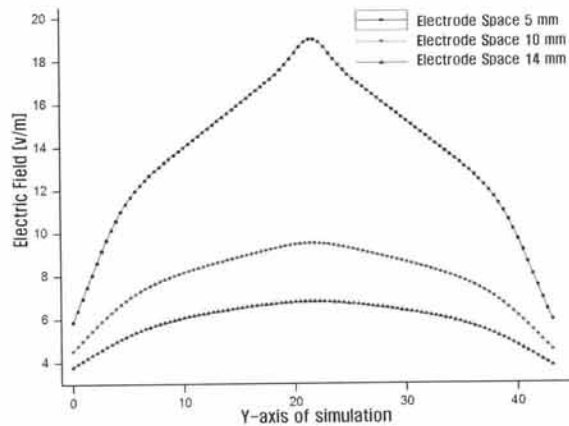


Fig. 6. Electric field distribution due to the change in the electrode spacing.

Table 4. Electric field utilization factor due to the electrode spacing.

Electrode space	5 mm	10 mm	14 mm
Maximum electric field [kV/mm]	19.034	9.514	6.815
Average electric field [kV/mm]	13.779	7.882	5.866
Electric field utilization factor	0.724	0.828	0.861

표 4에서 전극의 간격이 14 mm에서 5 mm로 가까워질수록 전계이용률의 수치는 초기보다 낮아진다는 것을 알 수 있으며, 전극 간격 5 mm 조건에서는 준 평

등조건에서 불평등조건으로 넘어가는 전계이용률 수치인 0.8보다 작아진다. 파센법칙의 경우에는 평등전계, 준 평등전계조건 (전계이용률 0.8 이상)일 경우에 성립한다는 전제조건을 가지고 있어 전극의 간격을 가까이하여 불평등전계조건을 이룬다고 가정하였을 경우 앞서 유추한 압력범위 조건이 성립하지 않을 확률이 존재한다.

4. 결론

시뮬레이션을 통해 스파크갭에서 원하는 파괴전압에 대한 압력 범위를 알아보기 위해서 파센법칙을 적용하여 절연체별 압력을 유추하는 방법을 알아보았다. 또한, 스파크갭의 형상에 따른 전계의 분포를 수치상으로 정량화하여 분석할 수 있는 전계이용률을 사용하여 전극의 갭 간격 변화에 따른 전극의 전계 상태 (평등·불평등 전계)를 분석하였다.

1. 파센법칙은 이론적으로 평등전계, 준평등전계에서 이론이 성립되고 시뮬레이션을 통해 평등전계가 증명되었다면 본 법칙을 적용할 수 있다. 하지만, 구조적으로 불평등전계를 이루거나 환경적인 조건이 방전현상에 미치는 인자로 작용할 경우에 예상되는 파괴전압보다 낮은 전압에서 파괴될 수 있다. 이런 문제점이 예상될 경우에는 전극 간격의 변화나 전극의 형상 개선을 통해 전계이용률을 변화시켜 문제를 해결할 수 있다.

2. 시뮬레이션에서 전계분포를 통해 전계집중 현상 관찰이 가능하지만, 평등·불평등 여부를 확인할 수 없다. 하지만 전계이용률을 적용할 경우에는 수치상으로 전계의 전계분포 상태를 판단할 수 있다. 평등전계와 준평등전계에서만 적용할 수 있는 파센법칙을 적용할 때, 전계이용률을 우선하여 계산하고 파센법칙에 접근한다면 높은 신뢰성의 결과를 도출할 수 있다.

3. 고전압 발생장치에 스파크갭을 사용하여 수백 ps의 상승시간을 갖는 파형을 얻기 위해서는 전극의 간격이 작을수록 유리할 수 있다. 하지만 전극 간격이 가까워질수록 전극의 전계 이용률이 낮아지는 것을 알 수 있고 이런 경우 높은 압력의 절연가스를 사용하여 한다. 이 상황에서 연구자가 원하는 파형을 얻기 위해 스파크갭을 제작 시 전극에 대한 시뮬레이

선과 전극 간격에 대한 전계이용률을 고려한 후 제작을 한다면 시간 단축과 기술적 신뢰성을 확보하는데 유리할 것이다.

4. 본 연구는 고전압 방전 스파크갭의 시뮬레이션 결과를 이론에 적용하여 도출한 결과이다. 이런 이유로 시뮬레이션 결과를 증명할 수 있는 실제 스파크갭을 제작하여 같은 조건으로 실험을 진행하고 결과를 비교·분석할 필요성이 있다. 또한, 스파크갭이 구조적으로 불평등전계일 경우 파센법칙의 예상되는 결과 값과 실제 실험 결과 값의 차이가 어느 정도 발생하는지에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

감사의 글

“본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구 결과로 수행되었음” (NIPA-2013-H0301-13-1010).

REFERENCES

- [1] J. S. Doo, S. M. Han, C. S. Huh, and J. S. Choi, *Trans., KIEE*, 59, 1850 (2010).
- [2] J. M. Lehr, C. E. Baum, and W. D. Prather, *Switching Note*, 28, (1997).
- [3] E. Husain and R. S. Nema, *IEEE Trans. Electr. Insul.*, EI-17, 350 (1982).
- [4] H. Fujita, T. Kouno, Y. Noguchi, and S. Ueguri, *Cryogenics*, 18, 195 (1978).
- [5] S. H. Nam and H. K. Kang, *Trans., KIEE*, 60, 1005 (2011).
- [6] H. K. Kang and T. K. Ko, *PSAC*, 12, 52 (2010).
- [7] B. T. Lee, C. H. Hwang, T. H. Lee, C. S. Huh, and Y. M. Chang, *Trans. KIEE*, 59, 1416 (2010).
- [8] F. Li, Y. W. Yoo, D. K. Kim, and B. H. Lee, *JIEIE*, 24, 142 (2010).