

불평등 전기장에서 변압기 절연유 절연파괴 연구

조하영¹, 이순형², 황미용³, 최용성^{1,2} 

¹ 동신대학교 전기전자공학과

² 동신대학교 전기공학과

³ 조선대학교 문화학과

Study on the Breakdown of the Transformer Insulating Oil in Nonuniform Electric Field

Ha-Young Cho¹, Soon-Hyung Lee², Mi-Yong Hwang³, and Yong-Sung Choi^{1,2}

¹ Department of Electrical and Electronics, Dongshin University, Naju 58245, Korea

² Department of Electrical Eng., Dongshin University, Naju 58245, Korea

³ Department of Culture Studies, Chosun University, Gwangju 61459, Korea

(Received March 14, 2023; Revised March 21, 2023; Accepted March 21, 2023)

Abstract: A breakdown voltage and breakdown electric field of the transformer insulating oil of liquid dielectric were studied in uniform electric field and non-uniform electric field and the transformer insulating oil was observed by the process reached breakdown. Insulation performance evaluation of the liquid dielectric was evaluated at the electrode spacing of 2.5 mm under the conditions of domestic and international standards (KS C IEC 60156), so a comparative review was conducted at the electrode spacing of 2.5 mm. When the electrode spacing is 2.5 mm, the average breakdown voltage is 38.5 kV for sphere-sphere electrodes, 26.6 kV for plate-plate electrodes, 22.9 kV for needle-needle electrodes, and 24.3 kV for sphere-needle electrodes. 23.7 kV for the sphere-plate electrode, and 20.7 kV for the needle-plate electrode. From these results, it can be seen that the average value of the breakdown voltage at the electrode spacing of 2.5 mm, in ascending order, is sphere-sphere, plate-plate, sphere-needle, sphere-plate, needle-needle and needle-plate. It was found that the breakdown voltage of the unequal field was lower than that of the equal field.

Keywords: Breakdown voltage, Breakdown electric field, Transformer insulating oil, Dielectric, Uniform electric field

1. 서론

최근 산업의 발달과 경제 성장으로 인하여 가정이나 사무실에서 사용되고 있는 전기제품과 산업현장에서 사용되고 있는 전력설비는 지속적으로 증가하고 있으며 산업체

현장에서는 고신뢰성, 고품질의 전력에너지와 설비안전 및 보수의 간편화, 전력계통 운용의 신뢰성 및 안전성 확보가 요구되고 있다 [1,2]. 또한 전력설비는 대용량화 및 초고압화가 매우 빠르게 진행되고 있고, 전력계통의 변성기기의 용량이 커져가므로 절연 및 냉각용 액체 절연 시스템의 보다 더 높은 신뢰성이 요구되고 있다 [2]. 전력계통설비에서는 아직도 유입식 기기가 많이 사용되고 있는데 유입기기를 보다 경제적이고 효율적으로 관리할 수 있는 방안에 대한 대책이 필요하다고 생각되며, 이의 주요 관점은 기기의 절연에 관한 것이다 [3].

✉ Yong-Sung Choi; yschoi67@dsu.ac.kr

Copyright ©2023 KIEEME. All rights reserved.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

현재 전력계통에 사용되는 유입식 기기에는 일반적으로 광유(mineral oil)를 사용하고 있고, 절연유 중 광유를 사용하고 있는 이유로는 다른 절연유에 비해 가격이 저렴하고 우수한 전기적 성능을 나타내고 있기 때문이며, 일반적으로 사용되고 있는 액체절연체는 유입 전력변성기에 주로 사용되고 절연체인 절연유는 원유를 정제하여 얻은 탄화수소를 주성분으로 한 광유로 1887년 미국에서 특허를 얻어 초기에는 파라핀계 광유가 주였으나 1925년경부터 나프텐계로 대체되고 있다 [1,4]. 전력변성 기기의 전기절연 및 냉각용으로 사용되는 광유 1종 2호는 적용 현장에서 약간의 불순물이나 수분 등이 포함되어 절연내력이 다소 낮아질 수 있다 [1].

액체유전체의 절연파괴에 관한 이론은 기체의 경우와 다르므로 영향을 주는 요소가 지나치게 많다는 사실과 액체의 분자구조가 복잡하므로 결정적인 이론이 확립되어 있지 않다고 생각되는데 이는 공기·수분·먼지·섬유질 등의 불순물이 함유되기 쉽고 이를 제거하는 일이 매우 곤란하며 이것들이 절연파괴 전압을 크게 변화시키기 때문이다 [5].

선행연구자들은 구 전극을 사용하여 평등 전계에서 유입 변압기용 절연유의 절연파괴 특성에 대하여 연구하였고 이 연구에서는 전극 간극의 거리가 커질수록 절연파괴 전압은 높아졌으며, 이는 불순물의 존재확률이 높아지므로 절연파괴 전압의 증가율은 감소하였고 절연파괴 전계는 전극 간 거리가 커질수록 감소하였다는 결과를 연구하였다 [1]. 다른 선행 연구자는 침-판 전극의 불평등 전계에서 절연파괴 특성을 연구하였다 [6,7].

따라서 본 논문에서는 구-구, 침-판 구조의 전계 이외의 절연파괴 특성을 알아보기 위하여 KS C 2301 규격과 KS C IEC 60156 규격에 의거해 광유 1종 2호를 사용하여 평등 전계와 불평등 전계에서 구-구, 판-판, 침-침, 구-침, 구-판, 침-판 전극 등 다양한 전극 형태와 전극 간격에 따른 전기적 특성을 알아보았다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

실험에 사용된 절연유 실험 장치는 조작부와 변압기부로 구성되어 있으며 이 장치의 회로도에는 그림 1과 같다. 절연유 실험 장치는 그림 2와 같이 안전을 위하여 1 m 이상 거리를 두어 구성하였고 입력전압 200 V, 정격용량 500 VA, 주파수는 60 Hz이다.

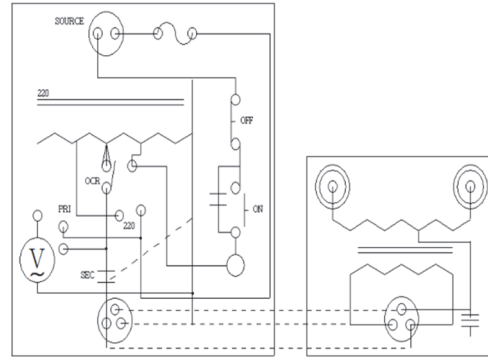


Fig. 1. Circuit diagram of experimental equipment.

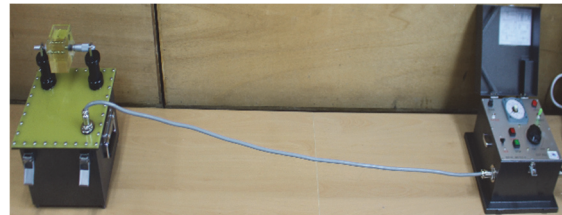


Fig. 2. Experimental equipment.

전압을 인가하고 측정값을 확인할 수 있는 조작부는 그림 3과 같다. 출력전압의 크기는 0~50 kV이고 승압속도는 2.5 kV/s이었다. 변압기와 평등, 불평등 전계를 위한 전극 형성 형태는 그림 4와 같으며 본 실험에서 사용한 다양한 전극의 형태는 그림 4와 같다. 그림 4에서 (a)는 구전극, (b)는 판전극, (c)는 침전극이다.

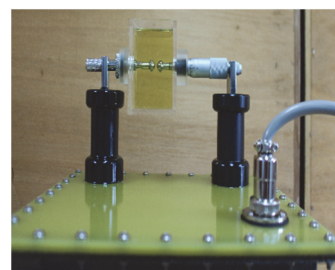


Fig. 3. The transformer of experimental equipment.

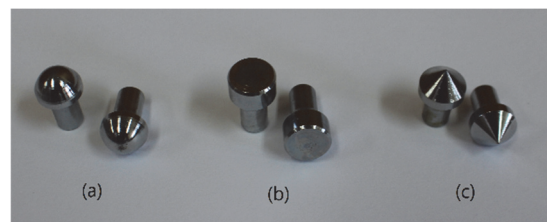


Fig. 4. Shape of electrodes: (a) sphere electrode, (b) flat electrode, and (c) needle electrode.

2.2 실험 방법

절연파괴 실험을 위한 실험 순서는 다음과 같다. ① 오일컵 및 전극을 세척, 건조하였다. ② 조작부와 변압기부의 회로를 구성하고 안전을 위하여 1 m 이상의 거리를 두어 수평상태, 무진동 조건의 장소에 설치하였다. ③ 전극 형태에 따른 구성 및 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하였다. ④ KS C IEC 60156의 규격에 근거하여 절연유를 오일컵에 채웠으며 절연유의 온도를 측정하였다. ⑤ KS C IEC 60156의 규격에 근거하여 약 5분 동안 기포가 없어질 때까지 안정시켰다. ⑥ 전원 스위치 OFF, 전압 조정기 '0'으로 확인하였다. ⑦ 2.5 kV/s의 속도로 승압시켰으며 절연파괴 전압과 온도를 확인하였다. ⑧ KS C IEC 60156의 규격에 근거하여 6회의 절연파괴 전압의 평균값을 확인하였다.

3. 결과 및 토의

구-구 전극에서 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하여 절연파괴 전압을 각각 6회씩 측정된 평균값을 나타낸 결과는 그림 5와 같다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전압의 평균값은 13.8 kV, 1.5 mm일 때는 20.1 kV, 2.0 mm일 때는 31.6 kV, 2.5 mm일 때는 38.5 kV, 3.0 mm일 때는 42.2 kV이었으며, 절연유의 온도는 절연파괴 시험 전후 24.0°C로 절연유 온도의 변화가 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 전극 간격이 1.0 mm에서 3.0 mm로 커짐에 따라 절연파괴 전압의 평균값도 13.8 kV에서 42.2 kV로 높아지는 것을 알 수 있었으며, 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전압의 표준편차는 2.6 kV, 1.5 mm일 때는 3.2 kV, 2.0 mm일 때는 2.1 kV, 2.5 mm일 때는 2.8 kV, 3.0 mm일 때는 6.6 kV이었다 [8].

구-구 전극에서 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하여 절연파괴 전계를 각각 6회씩 측정된 평균값을 나타낸 결과는 그림 6과 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전계의 평균값은 13.8 kV/mm, 1.5 mm일 때는 13.4 kV/mm, 2.0 mm일 때는 14.1 kV/mm, 2.5 mm일 때는 15.4 kV/mm, 3.0 mm일 때는 14.1 kV/mm이었으며, 절연유의 온도는 절연파괴 시험 전후 24.0°C로 절연유 온도의 변화가 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전계의 표준편차는 2.6 kV/mm, 1.5 mm일 때는 2.2 kV/mm, 2.0 mm일 때는 2.0 kV/mm, 2.5 mm일 때는 1.2

kV/mm, 3.0 mm일 때는 2.2 kV/mm이었으며, 절연파괴 전계의 평균값은 전극 간격이 2.5 mm일 때 15.4 kV/mm로 가장 높게 나타났음을 알 수 있었다.

판-판 전극에서 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하여 절연파괴 전압을 각각 6회씩 측정된 평균값을 나타낸 결과는 그림 7과 같다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전압의 평균값은 16.1 kV, 1.5 mm일 때는 21.3 kV, 2.0 mm일 때는 26.6 kV, 2.5 mm일 때는 26.6 kV, 3.0 mm일 때는 30.3 kV이었으며, 절연유의 온도는 절연파괴 시험 전후 24.0°C로 절연유 온도의 변화가 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 전극 간격

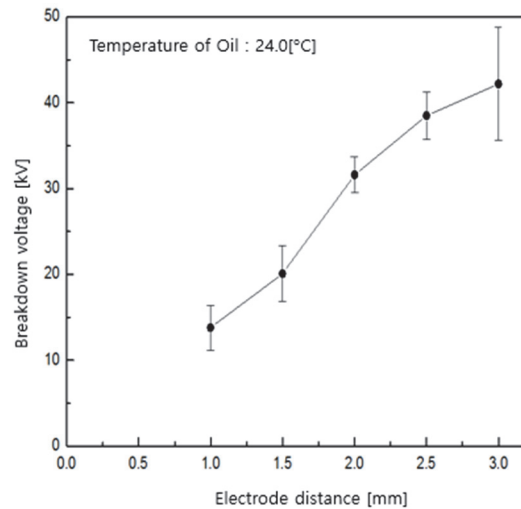


Fig. 5. The average value and standard deviation of the breakdown voltage in sphere-sphere electrode.

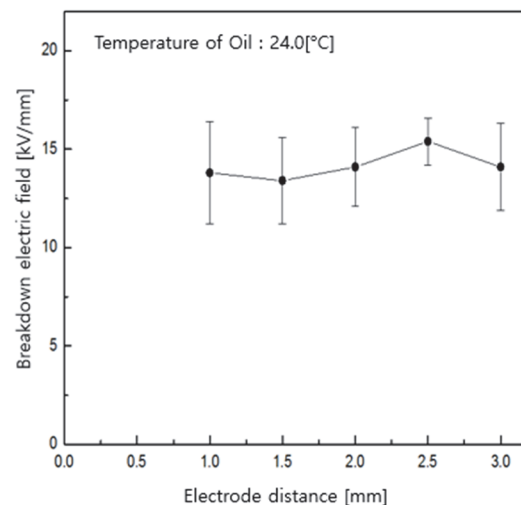


Fig. 6. The average value and standard deviation of the breakdown electric field in sphere-sphere electrode.

이 1.0 mm에서 3.0 mm로 커짐에 따라 절연파괴 전압의 평균값도 16.1 kV에서 30.3 kV로 높아지는 것을 알 수 있었으며, 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전압의 표준편차는 1.2 kV, 1.5 mm일 때는 4.1 kV, 2.0 mm일 때는 2.0 kV, 2.5 mm일 때는 5.4 kV, 3.0 mm일 때는 3.2 kV 이었다.

판-판 전극에서 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하여 절연파괴 전계를 각각 6회씩 측정한 평균값을 나타낸 결과는 그림 8과 같다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전계의 평균값은 16.1 kV/mm, 1.5 mm일 때는 14.2 kV/mm, 2.0 mm일 때는

13.3 kV/mm, 2.5 mm일 때는 10.7 kV/mm, 3.0 mm일 때는 10.1 kV/mm이었으며, 절연유의 온도는 절연파괴 시험 전후 24.0°C로 절연유 온도의 변화가 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전계의 표준편차는 1.2 kV/mm, 1.5 mm일 때는 2.8 kV/mm, 2.0 mm일 때는 1.0 kV/mm, 2.5 mm일 때는 2.1 kV/mm, 3.0 mm일 때는 1.1 kV/mm이었으며, 절연파괴 전계의 평균값은 전극 간격이 1.0 mm일 때 16.1 kV/mm로 가장 높게 나타났음을 알 수 있었다.

침-침 전극에서 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하여 절연파괴 전압을 각각

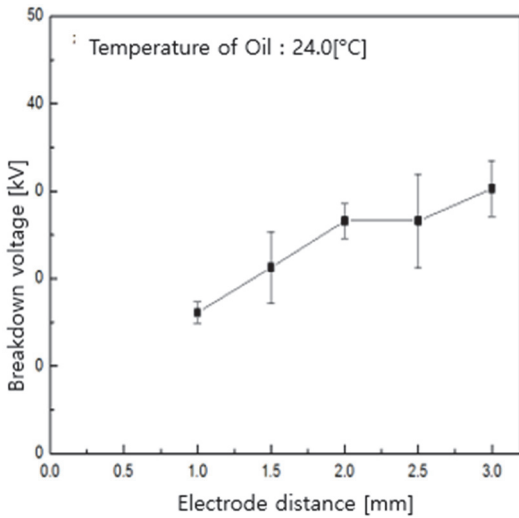


Fig. 7. The average value and standard deviation of the breakdown voltage in plane-plane electrode.

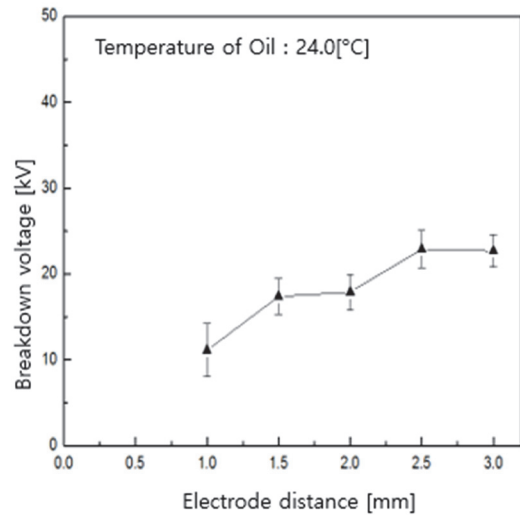


Fig. 9. The average value and standard deviation of the breakdown voltage in needle-needle electrode.

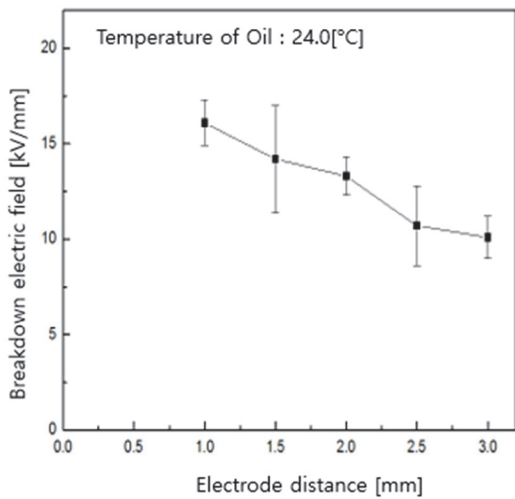


Fig. 8. The average value and standard deviation of the breakdown electric field in plane-plane electrode.

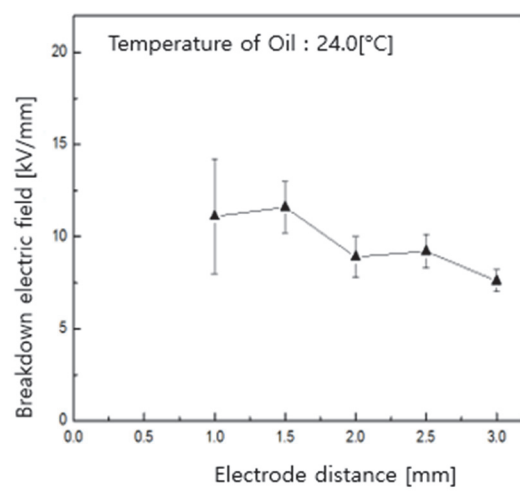


Fig. 10. The average value and standard deviation of the breakdown electric field in needle-needle electrode.

6회씩 측정된 평균값을 나타낸 결과는 그림 9와 같다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전압의 평균값은 11.1 kV, 1.5 mm일 때는 17.4 kV, 2.0 mm일 때는 17.9 kV, 2.5 mm일 때는 22.9 kV, 3.0 mm일 때는 22.7 kV이었으며, 절연유의 온도는 절연파괴 시험 전후 23.0°C로 절연유 온도의 변화가 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 전극 간격이 1.0 mm에서 3.0 mm로 커짐에 따라 절연파괴 전압의 평균값도 11.1 kV에서 22.7 kV로 높아지는 것을 알 수 있었으며, 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전압의 표준편차는 3.1 kV, 1.5 mm일 때는 2.1 kV, 2.0 mm일 때는 2.1 kV, 2.5 mm일 때는 2.2 kV, 3.0 mm일 때는 1.9 kV이었다.

침-침 전극에서 전극 간격을 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 조정하여 절연파괴 전계를 각각 6회씩 측정된 평균값을 나타낸 결과는 그림 10과 같다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전계의 평균값은 11.1 kV/mm, 1.5 mm일 때는 11.6 kV/mm, 2.0 mm일 때는 9.0 kV/mm, 2.5 mm일 때는 9.2 kV/mm, 3.0 mm일 때는 7.6 kV/mm이었으며, 절연유의 온도는 절연파괴 시험 전후 23.0°C로 절연유 온도의 변화가 나타나지 않았음을 알 수 있었다. 전극 간격이 1.0 mm일 때 절연파괴 전계의 표준편차는 3.1 kV/mm, 1.5 mm일 때는 1.4 kV/mm, 2.0 mm일 때는 1.1 kV/mm, 2.5 mm일 때는 0.9 kV/mm, 3.0 mm일 때는 0.6 kV/mm이었으며, 절연파괴 전계의 평균값은 전극 간격이 1.5 mm일 때 11.6 kV/mm로 가장 높게 나타났음을 알 수 있었다.

따라서 액체유전체의 절연성능 평가는 국내외 규격(KS C IEC 60156) 조건으로 전극 간격 2.5 mm에서 평가되고 있기 때문에 전극 간격 2.5 mm에서 비교 검토하였다. 전극 간격 2.5 mm에서 전극 형태에 따른 절연파괴 전압의 평균값을 나타낸 결과는 그림 11과 같다. 전극 간격 2.5 mm일 때 절연파괴 전압의 평균값은 구-구 전극에서 38.5 kV, 판-판 전극에서 26.6 kV, 침-침 전극에서 22.9 kV, 구-침 전극에서 24.3 kV, 구-판 전극에서 23.7 kV, 침-판 전극에서 20.7 kV이었다. 이들 결과로 보아 전극 간격 2.5 mm에서 절연파괴 전압의 평균값을 높은 순서대로 나열하면 구-구, 판-판, 구-침, 구-판, 침-침, 침-판이라는 것을 알 수 있었으며 불평등 전계가 평등 전계보다 절연파괴 전압이 낮다는 것을 알 수 있었다.

전극 간격 2.5 mm에서 전극 형태에 따른 절연파괴 전계의 평균값을 나타낸 결과는 그림 12와 같다. 전극 간격 2.5 mm일 때 절연파괴 전계의 평균값은 구-구 전극에서 15.4 kV/mm, 판-판 전극에서 10.7 kV/mm, 침-침 전극에서 9.2 kV/mm, 구-침 전극에서 9.7 kV/mm, 구-판 전

극에서 9.5 kV/mm, 침-판 전극에서 8.3 kV/mm이었다. 이들 결과로 보아 전극 간격 2.5 mm에서 절연파괴 전계의 평균값을 높은 순서대로 나열하면 구-구, 판-판, 구-침, 구-판, 침-침, 침-판이라는 것을 알 수 있었으며 불평등 전계가 평등 전계보다 절연파괴 전계가 낮다는 것을 알 수 있었다.

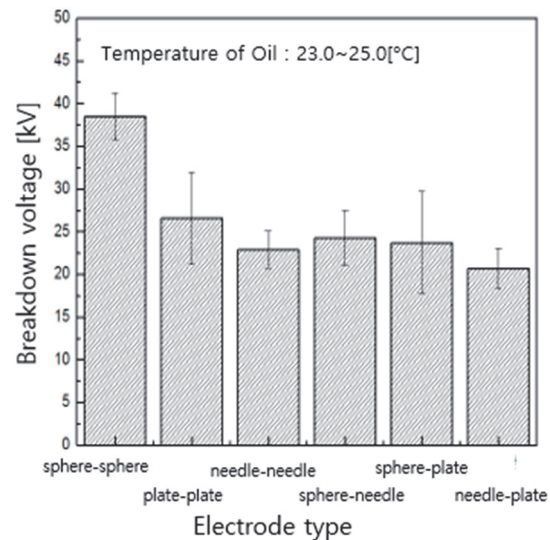


Fig. 11. The average value and standard deviation of the breakdown voltage according to shape of electrodes in 2.5 mm of electrode gap.

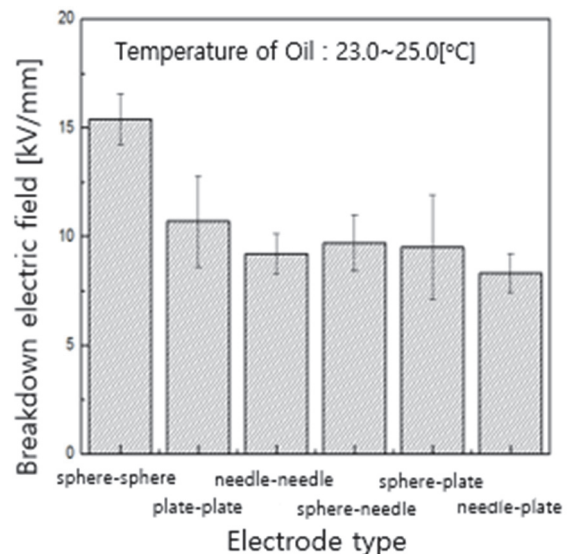


Fig. 12. The average value and standard deviation of the breakdown electric field according to shape of electrodes in 2.5 mm of electrode gap.

4. 결론

본 논문에서는 구-구 전극과 같은 평등 전계와 침-판 전극, 침-침 전극과 같은 불평등 전계에서 전기적 특성을 알아보기 위하여 변압기 절연유를 사용하여 전극 형태와 전극 간격을 각각 다르게 하여 평등 전계와 불평등 전계의 전기적 특성을 비교하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 액체유전체의 절연성능 평가는 국내외 규격(KS C IEC 60156) 조건으로 전극 간격 2.5 mm에서 평가되고 있기 때문에 전극 간격 2.5 mm에서 비교 검토하였다. 전극 간격 2.5 mm일 때 절연파괴 전압의 평균은 구-구 전극에서 38.5 kV, 판-판 전극에서 26.6 kV, 침-침 전극에서 22.9 kV, 구-침 전극에서 24.3 kV, 구-판 전극에서 23.7 kV, 침-판 전극에서 20.7 kV이었다. 이들 결과로 보아 전극 간격 2.5 mm에서 절연파괴 전압의 평균값을 높은 순서대로 나열하면 구-구, 판-판, 구-침, 구-판, 침-침, 침-판이라는 것을 알 수 있었으며 불평등 전계가 평등 전계보다 절연파괴 전압이 낮다는 것을 알 수 있었다.
- 2) 전극 간격 2.5 mm일 때 절연파괴 전계는 구-구 전극에서 15.4 kV/mm, 판-판 전극에서 10.7 kV/mm, 침-침 전극에서 9.2 kV/mm, 구-침 전극에서 9.7 kV/mm, 구-판 전극에서 9.5 kV/mm, 침-판 전극에서 8.3 kV/mm이었다. 이들 결과로 보아 전극 간격 2.5 mm에서 절연파괴 전계의 평균값을 높은 순서대로 나열하면 구-구, 판-판, 구-침, 구-판, 침-침, 침-판이라는 것을 알 수 있었으며 불평등 전계가 평등 전계보다 절연파괴 전계가 낮다는 것을 알 수 있었다.

ORCID

Yong-Sung Choi

<https://orcid.org/0000-0003-2904-2813>

REFERENCES

- [1] J. I. Jeong and C. S. Huh, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **66**, 1745 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.12.1745>]
- [2] C. H. Hwang, H. G. Sung, and C. S. Huh, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **57**, 245 (2008). [UCI: G704-000119.2008.57.2.004]
- [3] S. B. Kang, W. S. Kim, D. C. Chung, J. M. Joung, and M. H. Kwak, *J. Korean Phys. Soc.*, **71**, 986 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.71.986>]
- [4] J. Y. Jeong, Y. Kim, M. K. Lee, G. H. Han, H. Kim, D. Jin, J. Kim, E. Choi, H. S. Uhm, and G. Cho, *J. Korean Phys. Soc.*, **61**, 557 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.3938/jkps.61.557>]
- [5] J. Hao, R. H. Zou, R. J. Liao, L. J. Yang, Q. Liao, and M. Z. Zhu, *J. Electr. Eng. Technol.*, **13**, 1682 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.5370/JEET.2018.13.4.1682>]
- [6] S. H. Kang, H. I. Chae, J. P. Lee, and K. J. Lim, *J. Korean Soc. Saf.*, **19**, 56 (2004). [UCI: G704-000647.2004.19.1.020]
- [7] W. Mo, H. Song, Q. Huang, Y. Chen, and W. Wang, *Trans. Electr. Electron. Mater.*, **22**, 301 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.1007/s42341-020-00238-4>]
- [8] H. Y. Cho, *Master thesis, A Study on the Breakdown of the Transformer Insulating Oil in Nonuniform Electric Field*, p. 1-47, Dongshin University, Naju (2015).