

전극 형태와 전극 간 거리에 따른 전기적 특성 분석

김태희¹, 이순형², 황미용³, 최용성^{1,2} 

¹ 동신대학교 전기전자공학과

² 동신대학교 전기공학과

³ 조선대학교 문화학과

Electrical Characteristics Analysis According to Electrode Shape and Distance Between Electrodes

Tae-Hee Kim¹, 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 Engineering, Dongshin University, Naju 58245, Korea

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

(Received June 1, 2023; Revised June 7, 2023; Accepted June 7, 2023)

Abstract: In this paper, in order to analyze high electrical insulation and cooling performance using mineral oil, the liquid insulating oil was changed in electrode shape and distance between electrodes to compare and analyze electrical characteristics according to equal electric field, quasi-equivalent electric field, and unequal electric field. As a result, the breakdown voltages were 36,875 V and 36,875 V in the form of sphere-sphere and plate-plate electrodes with equal electric fields. The breakdown voltage was 31,475 V in the sphere-plate electrode type, which is a quasi-equilibrium field, and the breakdown voltage was 28,592 V, 27,050 V, and 22,750 V in the needle-needle, sphere-needle, and needle-plate electrode types, which are unequal fields. Through this, it is possible to know the difference in breakdown voltage according to the type of electric field. The more equal the field, the higher the breakdown voltage, and the more unequal field, the lower the breakdown voltage. The difference in insulation breakdown voltage could be seen depending on the type of electric field, the insulation breakdown voltage was higher for the more equal electric field, and the insulation breakdown voltage was lower for the more unequal electric field. Also, it was confirmed that the closer the distance between the electrodes, the higher the insulation breakdown voltage, the higher the insulation breakdown current, and the insulation breakdown voltage and the insulation breakdown current were proportional.

Keywords: Mineral oil, Liquid insulating oil, Insulation breakdown test, Electric field, Electrode shape

1. 서론

✉ 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.

최근 절연성능이 뛰어난 재료들이 개발되어 각종 전력 기기의 절연에 사용되고 있으나, 초고압화의 경향이 심해 절연유가 전력기기 절연에 중요한 역할을 하고 있다 [1]. 사용되고 있는 절연유에 요구되는 특성은 냉각특성이 우

수하고, 인화점이 높아야 하며, 높은 내부식성을 가져야 한다 [2].

현재 전기절연 및 냉각용으로 주종을 이루고 있으며 KSC 2301, KSC IEC 60156 규격의 광유 1종 2호를 사용하고 있다 [3]. 전기 절연유로 광유를 사용하기 때문에 화재의 위험성이 있어 절연유의 절연기능과 냉각기능이 정상범위에 있는지 확인할 필요가 있다. 특히, 현재 유입식 변압기에는 광유를 전기 절연유로 이용한 전기절연과 냉각방식을 사용하고 있는데 원유를 정제하여 1887년 미국에서 특허를 얻어 초기에는 파라핀계 광유가 사용되었으나 1925년부터는 나프탄계 광유가 사용되었다[4].

액체 유전체의 절연파괴현상을 관측하여 액체 유전체의 순도와 전극 형태, 불순물 등이 절연파괴에 미치는 영향이 연구되었으며, 침 전극을 이용하여 전극 간격과 곡률반경을 바꾸었을 때 달라지는 절연파괴 강도를 측정해 절연파괴의 기구 검토가 연구되었다 [2,5]. 또한 평등 전계와 불평등 전계에서 전극 형태와 전극 간격에 따라 절연파괴전압과 절연파괴전계에 대하여 연구되었다 [6]. 이렇게 액체 유전체의 변압기 절연유에 관한 연구가 수십 년간 많은 결과가 보고되었으며 그중 절연특성은 기포 발생과 불꽃 방전에 영향이 있음이 연구되었다 [7]. 전류의 열에 의해 기포가 발생하는 것이 절연파괴의 원인으로 고려되었으며, 전계 강도의 공간전하의 영향을 연구하여 전극 표면에서의 전계가 절연파괴의 원인이 된다고 연구되었다 [2].

본 논문에서는 전극 형태와 전극 간 거리에 따라 달라지는 액체 절연유의 전기절연성능을 분석하기 위해 절연파괴실험과 전압-전류 특성을 통해 액체 유전체의 전기적 특성을 알아보았다. 또한 평등 전계, 준평등 전계, 불평등 전계 등 전계의 종류에 따라 전기적 특성과 주위 온도와의 연관성을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

전기 절연유는 한국표준협회에서 인증한 전기 절연유로 인증번호는 제295호 규격제품으로 제3 석유류에 속하며, 규격번호는 KSC 2301 1종 2호를 사용하였다. 절연유 내압 시험기는 IP-55S로 입력전압은 AC 220 V, 60 Hz이고 출력전압은 AC 0~50 kV, 정격용량은 500 VA, 주파수는 60 Hz이다. 적외선 온도계는 SK-8700 II 모델로 비접촉식을 사용하였다. 그 외 타이머, 방전봉, 절연장갑 등을 실험에 사용하였으며, 구 전극, 판 전극, 침 전극을 사용하여 평등 전계, 준평등 전계, 불평등 전계가 되도록 하였다.

2.2 실험 방법

액체 유전체의 절연파괴실험은 타 연구자 [6]의 연구대로 전극 간격을 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 변경하였으며, 전극 형태는 구-판, 판-판, 구-침, 침-판, 침-침, 구-구 총 여섯 가지 형태로 변경하여 실험을 진행하였다. 그리고 OCR (over current relay, 과전류 계전기), POWER, START가 OFF인지 확인하였다. 준비된 시료함에 절연유를 전극이 충분히 잠기도록 채운 후, 수평을 잘 맞춰 시험기에 고정시키고 절연유의 안정화를 위해 약 5분간 대기하였다. 5분 후 절연유가 안정화된 것을 확인하고 절연파괴 실험을 시작하여 절연이 파괴될 때까지 기다렸다. 절연이 파괴되어 차단기가 내려가면 차단된 순간의 절연파괴전압을 측정하고 온도계를 사용하여 절연유의 온도를 기록하였다. 측정을 마치면 POWER-OFF를 한 후, 다시 절연유의 안정화를 위해 약 5분간 대기하였다. 위 실험을 전극 형태별로 전극 간격을 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm씩 바꿔서 전극 간격 각각에 실험을 6회씩 반복하였으며, 여섯 가지의 전극 형태에 따라 절연파괴실험을 반복하였다. 이때, 전극의 간격과 전극 형태를 바꿀 때마다 전원 콘센트를 제거하고 방전봉으로 전극을 방전시켜 준 후, 전극 간의 간격과 전극 형태를 변경하였다.

3. 결과 및 토의

3.1 절연파괴전압

평등 전계에서 절연유의 절연파괴전압을 알아보았다. 그림 1(a)과 같이 구-구 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 34,600 V이었고 전극 간 거리가 2.5 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 33,500 V이었으며 전극 간 거리가 3.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 42,525 V이었다. 그림 1(b)와 같이 판-판 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 42,250 V이었고 전극 간 거리가 2.5 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 49,250 V이었으며 전극 간 거리가 3.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 46,250 V이었다. 다음으로 준평등 전계에서 절연유의 절연파괴전압을 알아보았다. 그림 1(c)와 같이 구-판 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 19,125 V이었고 전극 간 거리가 2.5 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 36,750 V이었으며 전극 간 거리가 3.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 38,550 V이었다. 마지막으로 불평등 전

계에서 절연유의 절연파괴전압을 알아보았다. 그림 1(d)와 같이 침-침 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 31,500 V이었고 전극 간 거리가 2.5 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 27,250 V이었으며 전극 간 거리가 3.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 27,025 V이었다. 전극 간 거리가 멀어질 때 절연파괴전압이 저하된 이유는 침-침 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0~3.0 mm일 때 다른 전극 형태에서보다 불꽃 방전이 자주 일어났으며, 2.0 mm에서 불꽃 방전과 기포가 동시에 생겼고, 3.0 mm에서 연기 같은 형태로 카본이 생겼는데 이로 인해 절연유가 오염되어 절연능력이 떨어진 것으로 판단되었다. 그림 1(e)와 같이 구-침 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 19,700 V이었고 전극 간 거리가 2.5 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 29,000 V이었으며 전극 간 거리가 3.0 mm일 때, 절

연파괴전압의 평균은 32,450 V이었다. 그림 1(f)와 같이 침-판 전극 형태에서 전극 간 거리가 2.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 23,000 V이었고 전극 간 거리가 2.5 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 22,250 V이었으며 전극 간 거리가 3.0 mm일 때, 절연파괴전압의 평균은 23,000 V이었다. 그림 1(a)~(b)까지의 평등 전계에서 절연파괴전압이 그림 1(d)~(f)까지의 불평등 전계에서 절연파괴전압보다 상대적으로 높은 이유는 평등 전계에서 전극에 인가되는 전계가 일정하기 때문으로 생각된다 [6].

6가지의 전극 형태별로 절연파괴전압의 전체 평균을 비교한 결과, 판-판 전극 형태의 절연파괴전압이 36,875 V, 구-구 전극 형태의 절연파괴전압이 36,875 V, 구-판 전극 형태의 절연파괴전압이 31,475 V, 침-침 전극 형태의 절연파괴전압이 28,592 V, 구-침 전극 형태의 절연파괴전압이 27,050 V, 침-판 전극 형태의 절연파괴전압이 22,750

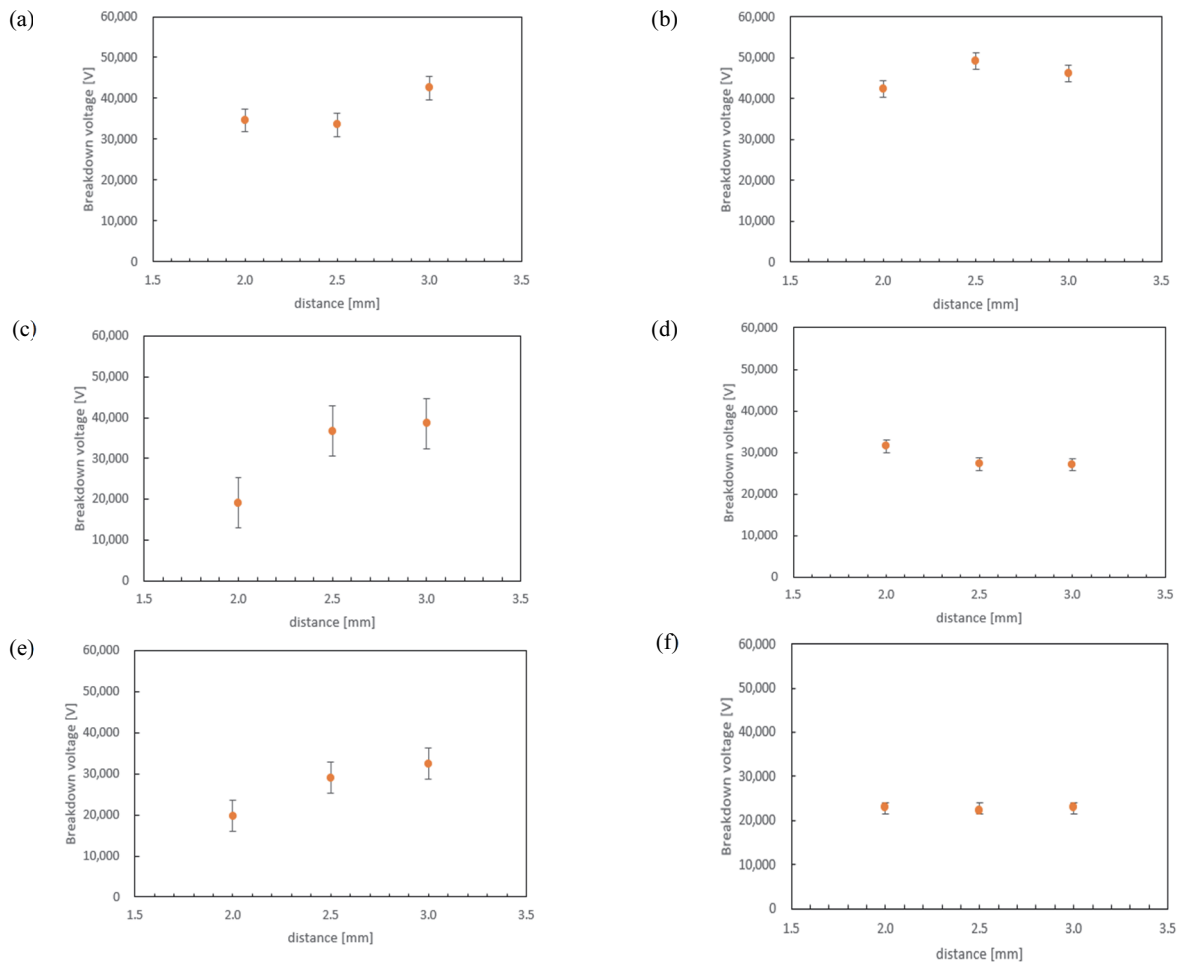


Fig. 1. Breakdown voltage. (a) Sphere-sphere electrodes, (b) flat-flat electrodes, (c) sphere-flat electrodes, (d) needle-needle electrodes, (e) sphere-needle electrodes, and (f) needle-flat electrodes.

V 순서로 절연파괴전압이 높은 것을 확인할 수 있었다.

전계의 종류에 따라 절연파괴전압을 조사하면 평등 전계인 구-구, 판-판 전극 형태에서 36,875 V, 36,875 V이었다. 준평등 전계인 구-판 전극 형태에서 31,475 V이었고, 불평등 전계인 침-침, 구-침, 침-판 전극 형태에서 28,592 V, 27,050 V, 22,750 V이었다. 이를 통해 전계의 종류에 따라 절연파괴전압의 차이를 알 수 있는데 평등 전계일수록 절연파괴전압이 높았고 불평등 전계일수록 절연파괴전압이 낮았다.

3.2 절연파괴전류

전극 형태에 따른 절연파괴전류를 비교해 보기 위해 식 (1)에 절연파괴전압을 대입하여 계산하였으며 그 결과를 그림 2에 나타내었다. 전극 간 거리가 2.0 mm일 때 전극 형태에 따른 절연파괴전류를 그림 2(a)에 나타내었다. 전극 간 거리가 2.0 mm일 때 구-구 전극 형태에서 절연파괴전류가 1.382 μA , 판-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 27.017 μA , 구-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 3.005 μA , 침-침 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.048 μA , 구-침 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.154 μA , 침-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.723 μA 이었다. 그림 2(b)는 전극 간 거리가 2.5 mm일 때 전극 형태에 따른 절연파괴전류를 나타낸다. 전극 간 거리가 2.5 mm일 때 구-구 전극 형태에서 절연파괴전류가 1.070 μA , 판-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 25.195 μA , 구-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 4.699 μA , 침-침 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.033 μA , 구-침 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.182 μA , 침-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.559 μA 이었다.

$$I = \frac{\lambda S}{d} V [A] \quad (1)$$

그림 2(c)는 전극 간 거리가 3.0 mm일 때 전극 형태에 따른 절연파괴전류를 나타낸다. 전극 간 거리가 3.0 mm일 때 구-구 전극 형태에서 절연파괴전류가 1.132 μA , 판-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 19.716 μA , 구-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 4.108 μA , 침-침 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.027 μA , 구-침 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.170 μA , 침-판 전극 형태에서 절연파괴전류가 0.482 μA 이었다. 그림 2(a)~(c)를 통해 전극 간 거리가 가까울수록 절연파괴전류가 높은 것을 확인하였다. 또한 식 (1)을 통해 절연파괴전압이 높을수록 절연파괴전류도 커지는 것을 확인하였으며, 절연파괴전압과 절연파괴전류가 비례한다는 것을 알 수 있었다.

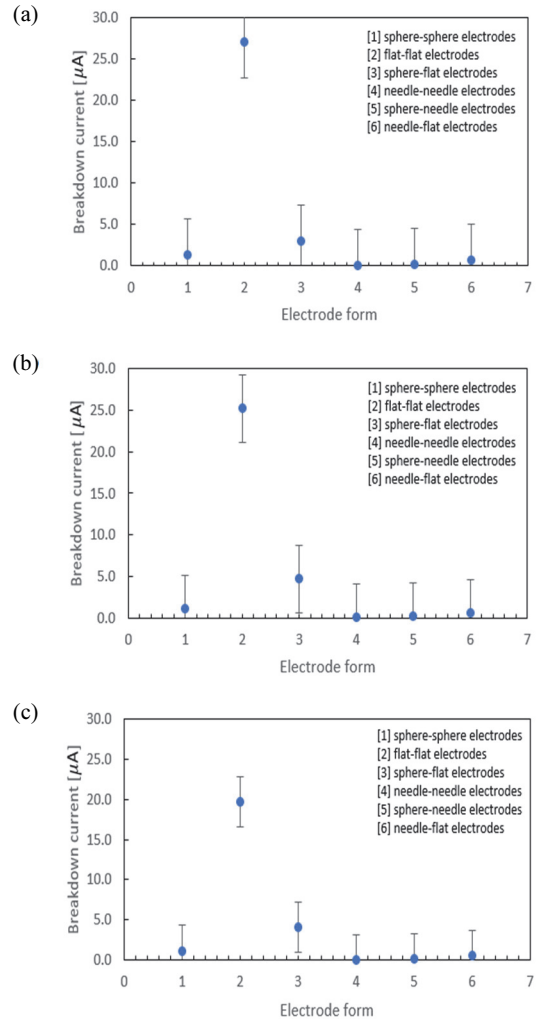


Fig. 2. Insulation breakdown current. (a) 2.0 mm, (b) 2.5 mm, and (c) 3.0 mm.

3.3 절연파괴실험 시 온도 변화

절연파괴 전, 후의 절연유 표면 온도를 그림 3에 나타내었다. 전극 형태가 구-구일 때 절연파괴 전 온도는 평균 22.00°C, 절연파괴 후 온도는 평균 21.33°C였다. 전극 형태가 판-판일 때 절연파괴 전 온도는 평균 23.00°C, 절연파괴 후 온도는 22.50°C였다. 전극 형태가 구-판일 때 절연파괴 전 온도는 21.00°C, 절연파괴 후 온도는 21.58°C였다. 전극 형태가 침-침일 때 절연파괴 전 온도는 24.00°C, 절연파괴 후 온도는 24.08°C였다. 전극 형태가 구-침일 때 절연파괴 전 온도는 24.00°C, 절연파괴 후 온도는 23.16°C였다. 전극 형태가 침-판일 때 절연파괴 전 온도는 24.00°C, 절연파괴 후 온도는 21.75°C였다.

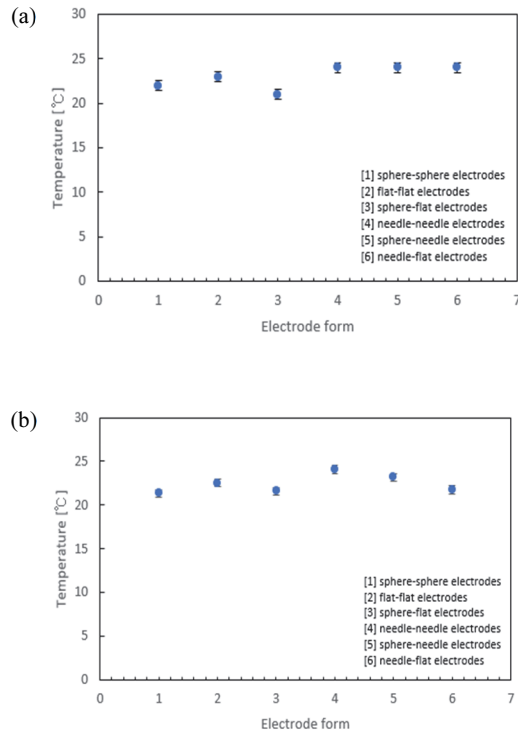


Fig. 3. Changes in surface temperature of insulating oil before and after dielectric breakdown. (a) Surface temperature before breakdown and (b) surface temperature after breakdown.

온도 변화를 통해 평등 전계인 구-구 전극 형태에서 온도가 22.00°C에서 21.33°C로, 판-판 전극 형태에서 온도가 23.00°C에서 22.50°C로, 불평등 전계인 침-침 전극 형태에서 온도가 24.00°C에서 24.08°C로, 구-침 전극 형태에서 온도가 24.00°C에서 23.16°C로, 침-판 전극 형태에서 온도가 24.00°C에서 21.75°C로 낮아지는 경향이 보였으나 준평등 전계인 구-판 전극 형태에서 21.00°C에서 21.58°C로 높아졌다. 전체적으로 실험 전 온도는 평균 23.16°C였으나 실험 후 온도는 평균 24.51°C로 온도 변화가 크게 변화하는 모습은 아니었기 때문에 절연파괴실험이 액체 절연유의 온도 변화에 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 논문에서는 광유를 사용하여 높은 전기절연 특성을 분석하기 위해 액체 절연유를 전극 형태와 전극 간 거리를 바꿔 평등 전계, 준평등 전계, 불평등 전계에 따라 전기적 특성을 비교 및 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 평등 전계인 구-구, 판-판 전극 형태에서 절연파괴전압은 36,875 V, 36,875 V이었다. 준평등 전계인 구-판 전극 형태에서 절연파괴전압은 31,475 V이었고, 불평등 전계인 침-침, 구-침, 침-판 전극 형태에서 절연파괴전압은 28,592 V, 27,050 V, 22,750 V이었다. 이를 통해 전계의 종류에 따라 절연파괴전압의 차이를 알 수 있는데 평등 전계일수록 절연파괴전압이 높았고 불평등 전계일수록 절연파괴전압이 낮았다.
- 2) 절연파괴실험 전후 절연유의 표면 온도 변화를 확인한 결과 전체적으로 실험 전 온도는 평균 23.16°C, 실험 후 온도는 평균 24.51°C였다. 이를 통해 온도 변화가 크게 변화하는 모습은 아니었으므로 절연파괴실험이 액체 절연유의 온도 변화에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단되었다.

본 논문의 결과는 유입 변압기의 설계 시에 철심, 코일, 리드선 등 평등 전계, 준평등 전계, 불평등 전계의 영향을 파악하는 선행 연구가 될 것이다. 향후에는 주위 온도 변화에 따른 연구가 필요할 것으로 사료된다.

ORCID

Yong-Sung Choi

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

REFERENCES

- [1] D. J. Lee, *J. Korea Soc. Comput. Inf.*, **26**, 53 (2021). [DOI: <https://doi.org/10.9708/jksci.2021.26.02.053>]
- [2] 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]
- [3] D. Lee, M. Lee, C. Park, J. Ha, H. Park, T. Jun, and B. Lee, *J. Energy Eng.*, **25**, 18 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.5855/ENERGY.2016.25.3.018>]
- [4] J. I. Yoo and J. H. Joung, *J. Korean Soc. Hazard Mitigation*, **14**, 255 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.9798/kosham.2014.14.5.255>]
- [5] T. I. Ji, *Master Thesis, A Study on Dielectric Breakdown of Electric Insulation Oil*, p. 22-45, Dongshin University, Naju, 2015.
- [6] H. Y. Cho, *Master Thesis, A Study on the Breakdown of the Transformer Insulating Oil in Nonuniform Electric Field*, p. 15-47, Dongshin University, Naju, 2015.
- [7] D. Y. Lim, S. G. Park, C. H. Park, K. C. Kim, K. S. Lee, and E. H. Choi, *J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, **28**, 52 (2014). [DOI: <https://doi.org/10.5207/jjeie.2014.28.6.052>]