

온도에 따른 액체 절연유의 전기적 특성

김태희¹, 최용성^{1,2} 

¹ 동신대학교 전기전자공학과

² 동신대학교 전기공학과

Electrical Properties of Liquid Insulation as a Function of Temperature

Tae-Hee Kim¹ 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

(Received December 19, 2023; Revised January 10, 2024; Accepted January 12, 2024)

Abstract: In this paper, the electrical properties of liquid insulating oil were analyzed by changing the ambient temperature change at 10°C in-tervals from 0°C to 30°C through an insulation breakdown experiment in order to analyze the insulation performance of liquid in-sulating oil that varies according to temperature changes. As a result, it was confirmed through experiments that the lower the am-bient temperature, the higher the insulation breakdown voltage, depending on both the electrode shape and the electrode interval, and it was determined that the lower the ambient temperature, the higher the insulation performance of the liquid insulating oil.

Keywords: Mineral oil, Liquid insulating oil, Insulation breakdown test, Ambient temperature, Electric field, Electrode form

1. 서론

전력기기용 절연유는 전력 수요 증가에 따라 초고압 송전에 있어서 절연의 중요성이 매우 크다 [1]. 초고압화의 경향이 심해 현재 절연유가 절연에 중요한 역할을 하고 있다 [2]. 산업체에서는 높은 품질의 전력 계통을 운용하기 위해 안정성 확보가 요구되었다 [3]. 현재 일반적으로 사용되고 있는 절연유는 KS C 2301 규격의 광유 제1종 2호를 사용하고 있다 [4]. 전기 절연유로 광유를 사용하기 때문에 화재의 위험성이 있어 절연유의 절연 성능이 정상 범위에 있는지 확인해야 한다 [5]. 액체 유전체의 절연 파괴 현상을 관측하여 액체 유전체의 전극 형태, 불순물 등 절연 파

괴에 미치는 영향이 연구되었으며, 침 전극을 이용하여 전극 간격과 곡률반경을 바꾸었을 때의 절연 파괴를 측정해 검토하는 연구가 진행되었다 [6,7]. 또한 절연 특성은 기포 발생과 불꽃 방전에 영향이 있음이 연구되었다 [8]. 평등 전계와 불평등 전계에서 전극 형태와 전극 간격에 따라 절연 파괴 전압과 절연 파괴 전계에 대하여 연구되었다 [3].

본 논문에서는 온도 변화에 따라 달라지는 액체 절연유의 절연 성능을 분석하기 위해 절연 파괴 실험을 통해 주위 온도 변화를 0~30°C까지 10°C 간격으로 변경하여 액체 절연유의 전기적 특성을 분석하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 실험 장치

전기 절연유는 한국표준협회에서 인증한 제295호 제3

✉ Yong-Sung Choi; yschoi67@dsu.ac.kr

Copyright ©2024 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.



Fig. 1. Insulating oil pressure tester.



Fig. 2. Electrode shape.

석유류에 속하며, 규격번호는 KSC 2301 제1종 2호를 사용하였다.

그림 1의 절연유 내압 시험기는 HD-55로 입력전압은 AC 220 V, 출력전압은 AC 0~50 kV, 정격용량은 500 VA, 주파수는 60 Hz였다.

적외선 온도계는 SK-8700 II 비접촉식 온도계를 사용하였으며, 그 외 타이머, 방전봉, 절연장갑 등을 사용하였다.

또한 그림 2와 같이 3 mm의 구 전극, 6 mm의 판 전극, 1 mm의 침 전극을 사용하여 총 여섯 가지 전극 조합을 실험에 사용하였다.

2.2 실험 방법

액체 유전체의 절연 파괴 실험은 절연유 주위 온도를 0~30°C까지 10°C 간격으로 변경하여 실험을 진행하였고, 전극 간격을 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm로 변경하였으며, 전극 형태는 구-구, 판-판, 구-판, 구-침, 침-판, 침-침 총 여섯 가지 형태로 변경하였다. 실험 장치를 준비

하고 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. 절연유가 안정화되면 OCR-ON, power-on을 한 후 start를 누르고 절연이 파괴되는 순간의 절연 파괴 전압을 측정하고 절연유의 온도를 측정하였다. 측정이 끝나면 power-off를 한 후, 다시 절연유의 안정화를 위해 약 5분간 대기하였다. 위 실험을 여섯 가지 전극 형태별로 변경하고, 전극 간격을 1.5 mm, 2.0 mm, 2.5 mm, 3.0 mm씩 변경하여 실험을 6회씩 반복하였다.

3. 결과 및 토의

액체 유전체의 절연 파괴 전압실험은 액체 유전체의 전기 절연 특성을 평가하기 위해 수행되는 실험 중 하나로서, 액체 유전체가 전기적으로 절연되는 능력을 어느 정도까

지 갖고 있는지를 결정하는 데 사용되었다. 절연 파괴 전압은 전기적으로 절연된 물질이나 시스템이 얼마나 높은 전압까지 견딜 수 있는지를 나타내는 전기적 특성 중 하나이며, 절연의 두께와 거리, 절연 물질의 종류 등에 따라서 각각 다른 절연 파괴 전압을 가질 수 있다.

3.1 0°C에서 절연 파괴 전압

그림 3은 주위 온도가 0°C일 때 절연 파괴 전압을 그래프로 나타냈으며, 표 1은 주위 온도가 0°C일 때 절연 파괴 전압을 표로 정리하여 나타냈다. 그림 3(a)에서 구-구 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 31,667 V, 2.0 mm에서 35,833 V, 2.5 mm에서 44,500 V, 3.0 mm에서 47,833 V로 측정되었다. 그림 3(b)에서 판-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 25,000 V, 2.0 mm에서 26,000 V, 2.5 mm에서 31,000 V, 3.0 mm에서 39,667 V로 측정되었다. 그림 3(c)에서 구-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 27,333 V, 2.0 mm에서 38,000 V, 2.5 mm에서 41,333 V, 3.0 mm에서 43,833 V

로 측정되었다. 그림 3(d)에서 침-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 30,000 V, 2.0 mm에서 33,167 V, 2.5 mm에서 36,333 V, 3.0 mm에서 37,333 V로 측정되었다. 그림 3(e)에서 구-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 22,500 V, 2.0 mm에서 26,333 V, 2.5 mm에서 27,333 V, 3.0 mm에서 32,833 V로 측정되었다. 그림 3(f)에서 침-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 15,333 V, 2.0 mm에서 23,333 V, 2.5 mm에서 28,667 V, 3.0 mm에서 34,500 V로 측정되었다. 이를 통해, 전극 간격이 멀어질수록 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였으며, 구-구, 구-판, 침-침, 판-판, 구-침, 침-판 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 전극 간격과 전극 형태에 따라 비교하였을 때, 접촉 면적이 작을수록 절연 파괴 전압이 높아짐으로써 접촉 면적의 차이와 거리로 인하여 절연 파괴 전압이 달라진다고 판단되었다.

3.2 10°C에서 절연 파괴 전압

그림 4는 주위 온도가 10°C일 때 절연 파괴 전압을 그래프로 나타냈으며, 표 2는 주위 온도가 10°C일 때 절연 파괴 전압을 표로 정리하여 나타냈다. 그림 4(a)에서 구-구 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 28,167 V, 2.0 mm에서 31,500 V, 2.5 mm에서 38,833 V, 3.0 mm에서 40,667 V로 측정되었다. 그림 4(b)에서 판-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 17,167 V, 2.0 mm에서 24,000 V, 2.5 mm에서 28,667 V, 3.0 mm에서 37,667 V로 측정되었다. 그림 4(c)에서 구-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 25,167 V, 2.0 mm에서 33,667 V, 2.5 mm에서 35,667 V, 3.0 mm에서 40,667 V로 측정되었다. 그림 4(d)에서 침-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 15,500 V, 2.0 mm에서 22,500 V, 2.5 mm에서 28,667 V, 3.0 mm에서 34,500 V로 측정되었다.

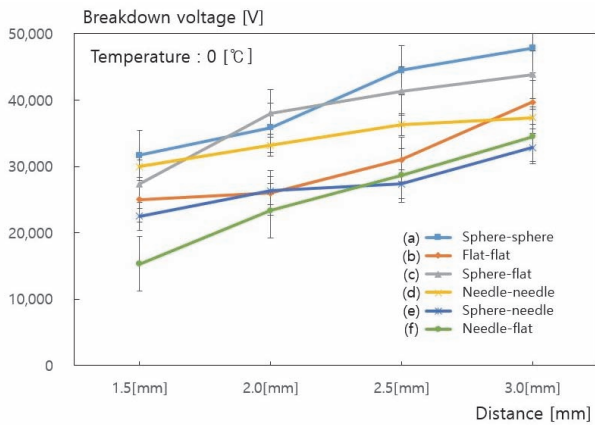


Fig. 3. Breakdown voltage 0°C.

Table 1. Insulation breakdown voltage at 0°C. Unit: [V]

Electrode form	Distance			
	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
Sphere-sphere	31,667	35,833	44,500	47,833
Flat-flat	25,000	26,000	31,000	39,667
Sphere-flat	27,333	38,000	41,333	43,833
Needle-needle	30,000	33,167	36,333	37,333
Sphere-needle	22,500	26,333	27,333	32,833
Needle-flat	15,333	23,333	28,667	34,500

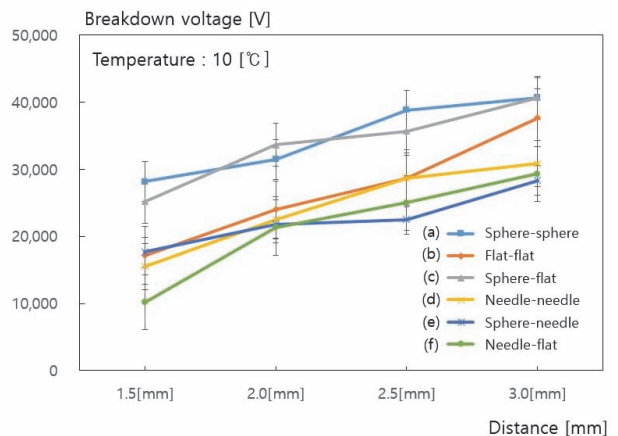


Fig. 4. Breakdown voltage 10°C.

Table 2. Insulation breakdown voltage at 10°C. Unit: [V]

Electrode form	Distance			
	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
Sphere-sphere	28,167	31,500	38,833	40,667
Flat-flat	17,167	24,000	28,667	37,667
Sphere-flat	25,167	33,667	35,667	40,667
Needle-needle	15,500	22,500	28,667	30,833
Sphere-needle	17,667	21,833	22,500	28,333
Needle-flat	10,167	21,333	25,000	29,333

mm에서 28,667 V, 3.0 mm에서 30,833 V로 측정되었다. 그림 4(e)에서 구-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 17,667 V, 2.0 mm에서 21,833 V, 2.5 mm에서 22,500 V, 3.0 mm에서 28,333 V로 측정되었다. 그림 4(f)에서 침-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 10,167 V, 2.0 mm에서 21,333 V, 2.5 mm에서 25,000 V, 3.0 mm에서 29,333 V로 측정되었다. 이를 통해, 전극 간격이 멀어질수록 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였으며, 구-구, 구-판, 판-판, 침-침, 침-판, 구-침 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 전극 간격과 전극 형태에 따라 비교하였을 때, 접촉 면적의 차이와 거리로 인하여 절연 파괴 전압이 달라진다고 판단되었기 때문에 0°C에서와 같이 구-구 전극 형태 또는 구-판 전극 형태 등에서 높은 절연 파괴 전압이 나타남을 확인하였다.

3.3 20°C에서 절연 파괴 전압

그림 5는 주위 온도가 20°C일 때 절연 파괴 전압을 그래프로 나타냈으며, 표 3은 주위 온도가 20°C일 때 절연 파괴 전압을 표로 정리하여 나타냈다. 그림 5(a)에서 구-구 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 27,000 V, 2.0 mm에서 33,500 V, 2.5 mm에서 36,167 V, 3.0 mm에서 38,000 V로 측정되었다. 그림 5(b)에서 판-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 24,000 V, 2.0 mm에서 25,833 V, 2.5 mm에서 26,333 V, 3.0 mm에서 31,833 V로 측정되었다. 그림 5(c)에서 구-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 22,167 V, 2.0 mm에서 25,500 V, 2.5 mm에서 29,333 V, 3.0 mm에서 33,500 V로 측정되었다. 그림 5(d)에서 침-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 14,667 V, 2.0 mm에서 21,333 V, 2.5 mm에서 26,667 V, 3.0 mm에서 29,500 V로 측정되었다. 그림 5(e)에서 구-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 15,167 V, 2.0 mm에서 19,833 V, 2.5 mm에서 22,833 V, 3.0 mm에서 29,833 V로 측정되었다. 그림 5(f)에서 침-판 전

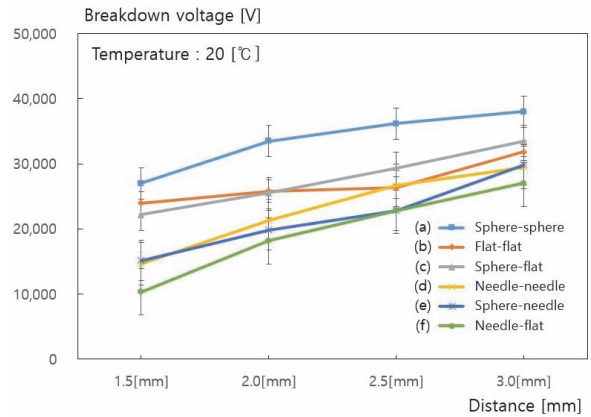


Fig. 5. Breakdown voltage 20°C.

Table 3. Insulation breakdown voltage at 20°C. Unit: [V]

Electrode form	Distance			
	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
Sphere-sphere	27,000	33,500	36,167	38,000
Flat-flat	24,000	25,833	26,333	31,833
Sphere-flat	22,167	25,500	29,333	33,500
Needle-needle	14,667	21,333	26,667	29,500
Sphere-needle	15,167	19,833	22,833	29,833
Needle-flat	10,333	18,167	22,833	27,000

극 형태일 때, 1.5 mm에서 10,333 V, 2.0 mm에서 18,167 V, 2.5 mm에서 22,833 V, 3.0 mm에서 27,000 V로 측정되었다. 이를 통해, 전극 간격이 멀어질수록 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였으며, 구-구, 구-판, 판-판, 침-침, 구-침, 침-판 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 전극 간격과 전극 형태에 따라 비교하였을 때, 접촉 면적의 차이와 거리로 인하여 절연 파괴 전압이 달라진다고 판단되었기 때문에 0°C, 10°C에서와 같이 구-구 전극 형태 또는 구-판 전극 형태, 나아가 판-판 전극 형태 등에서 높은 절연 파괴 전압이 나타남을 확인하였다.

3.4 30°C에서 절연 파괴 전압

그림 6은 주위 온도가 30°C일 때 절연 파괴 전압을 그래프로 나타냈으며, 표 4는 주위 온도가 30°C일 때 절연 파괴 전압을 표로 정리하여 나타냈다. 그림 6(a)에서 구-구 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 23,833 V, 2.0 mm에서 26,833 V, 2.5 mm에서 29,000 V, 3.0 mm에서 34,667 V로 측정되었다. 그림 6(b)에서 판-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에

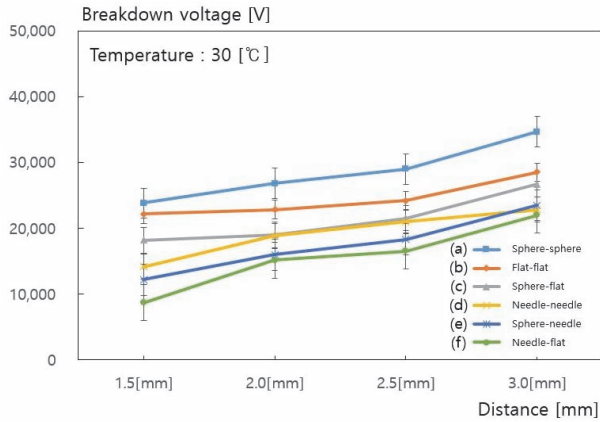


Fig. 6. Breakdown voltage 30°C.

Table 4. Insulation breakdown voltage at 30°C. Unit: [V]

Electrode form \ Distance	Distance			
	1.5 mm	2.0 mm	2.5 mm	3.0 mm
Sphere-sphere	23,833	26,833	29,000	34,667
Flat-flat	22,167	22,833	24,167	28,500
Sphere-flat	18,167	19,000	21,500	26,667
Needle-needle	14,167	18,833	21,000	22,833
Sphere-needle	12,167	16,000	18,333	23,500
Needle-flat	8,667	15,167	16,500	22,000

서 22,167 V, 2.0 mm에서 22,833 V, 2.5 mm에서 24,167 V, 3.0 mm에서 28,500 V로 측정되었다. 그림 6(c)에서 구-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 18,167 V, 2.0 mm에서 19,000 V, 2.5 mm에서 21,500 V, 3.0 mm에서 26,667 V로 측정되었다. 그림 6(d)에서 침-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 14,167 V, 2.0 mm에서 18,833 V, 2.5 mm에서 21,000 V, 3.0 mm에서 22,833 V로 측정되었다. 그림 6(e)에서 구-침 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 12,167 V, 2.0 mm에서 16,000 V, 2.5 mm에서 18,333 V, 3.0 mm에서 23,500 V로 측정되었다. 그림 6(f)에서 침-판 전극 형태일 때, 1.5 mm에서 8,667 V, 2.0 mm에서 15,167 V, 2.5 mm에서 16,500 V, 3.0 mm에서 22,000 V로 측정되었다. 이를 통해, 전극 간격이 멀어질수록 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였으며, 구-구, 판-판, 구-판, 침-침, 구-침, 침-판 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 전극 간격과 전극 형태에 따라 비교하였을 때, 접촉 면적의 차이와 거리로 인하여 절연 파괴 전압이 달라진다고 판단되었다. 또한, 모두 동일한 전극 형태들과 전극 간 거리에서 각각의 주위 온도에 따라 비교해 보았을 때, 주위 온도에 따라 다른 절

연 파괴 전압이 나타났다. 이는 온도의 변화로 절연체 내부의 분자 구조가 달라지게 되면서 절연 파괴 전압이 달라지는 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 논문에서는 온도 변화에 따라 달라지는 액체 절연유의 절연 성능을 분석하기 위해 절연 파괴 실험을 전극 형태와 전극 간 거리를 변경하고, 주위 온도 변화를 0~30°C까지 10°C 간격으로 변경하여 액체 유전체의 전기적 특성을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주위 온도가 0°C에서 구-구, 구-판, 침-침, 판-판, 구-침, 침-판 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였다.
- 2) 주위 온도가 10°C에서 구-구, 구-판, 판-판, 침-침, 침-판, 구-침 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였다.
- 3) 주위 온도가 20°C에서 구-구, 구-판, 판-판, 침-침, 구-침, 침-판 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였다.
- 4) 주위 온도가 30°C에서 구-구, 판-판, 구-판, 침-침, 구-침, 침-판 순서대로 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였다.

위 결과를 통해, 주위 온도가 낮을수록 절연 파괴 전압이 높은 것을 확인하였으며, 액체 절연유의 절연 성능이 높은 것을 확인하였다.

0°C에서 절연체의 분자 구조가 밀도 있게 배치되어 전기 저항이 높아짐으로써 가장 높은 절연 파괴 전압이 나타났으며, 10°C와 20°C에서 온도가 상승하면서 전기 저항이 감소하여 절연 파괴 전압도 0°C와 비교하였을 때 감소하는 경향이 나타났고, 30°C에서 전기 저항이 더 낮아지면서 낮은 절연 파괴 전압이 나타났다.

또한, 구-구 전극 형태에서는 접촉 면적이 매우 작아 전류가 흐르는 정도가 제한되므로 전기적 저항이 증가하여 전압이 높게 나타날 수 있으며, 침-침, 구-판, 침-판 전극 형태에서는 전극 간 접촉 면적과 구조에 따라 전류 및 전기 저항이 달라져 절연 파괴 전압이 변동될 수 있다고 판단되었다.

위 연구 결과는 절연체와 액체 절연유의 절연 특성에 온도와 전극 형태 등이 분자 구조나 특정 환경 조건에 따라 어떻게 영향을 미치는지를 실험적으로 입증하였으며, 이러한 정보는 전기 기기나 시스템 설계, 절연 재료의 선택,

환경 조건 등에서 중요한 고려 사항으로 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

ORCID

Yong-Sung Choi

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

REFERENCES

- [1] S. C. Cho, *Master Thesis, The Effect of Impurities on Dielectric Breakdown in Insulating Oil*, p. 1, Kwangwoon University, Seoul (1983).
- [2] D. J. Lee, *J. Korea Soc. Comput. Inf.*, **26**, 53 (2021).
doi: <https://doi.org/10.9708/jksci.2021.26.02.053>
- [3] 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 (2014).
- [4] 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>
- [5] 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>
- [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] T. I. Ji, *Master Thesis, A Study on Dielectric Breakdown of Electric Insulation Oil*, p. 1, Dongshin University, Naju (2015).
- [8] 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/JIEIE.2014.28.6.052>