

부하 개폐기용 진공차단기의 열 해석 특성

장경욱 

가천대학교 전기공학과

Thermal Analysis Characteristics of Vacuum Interrupter for Load Switcher

Kyunguk Jang

Department of Electrical Engineering, Gachon University, Seongnam 13120, Korea

(Received February 22, 2021; Revised February 25, 2021; Accepted March 2, 2021)

Abstract: The 22.9 kV vacuum interrupter (VI) built-in load bus switcher (LBS), which is most often used as a load switch for distribution, extinguishes the arc that occurs during normal load opening and closing and fault current interruption within the VI housing to quickly switch circuits. As a protective device for contact separation, the rated current is supplied in a normal state. When a fault current flows due to a fault or an accident in the power system, the contact is disconnected in a vacuum state to block the fault current. In this study, in order to design the optimal VI, the heat dissipation characteristics of VI according to the center electrode distance 0/1/2/3 cm were analyzed by applying the finite element method, and the results were reflected to improve the structure of the VI.

Keywords: VI (vacuum interrupter), LBS (load bus switcher), Comsol, FEM, VI design

1. 서론

LBS (load bus switcher)는 전기회로에서 발생할 수 있는 단락, 지락 등의 고장전류로부터 각종 설비 및 기기, 선로 등을 보호하는 기기로서, 차단 소호 매질에 따라 여러 가지 형태로 구분할 수 있으며, 특히 진공을 소호매질로 하여 사용하는 VI (vacuum interrupter)를 내장한 LBS가 주로 사용되고 있다 [1].

부하개폐기로 가장 많이 사용되고 있는 VI 내장형 LBS는 정상부하 개폐 및 고장전류 차단 시에 발생하는 아크를 VI의 하우징 내에서 소호시켜 신속하게 전력 계통회로를 분리시키는 보호기기이다. 통상 정상 상태에서는 정격전

류를 통전시키고, 전력계통에 고장 또는 사고가 발생하여 고장전류가 흐르면 진공상태에서 접점을 분리하여 고장전류를 차단하도록 되어 있다.

이때, VI 하우징 내부는 아크 소호를 위해 항상 진공상태로 유지되는데, 이러한 VI 진공 하에서 높은 절연내력을 갖는 이점을 이용하여 고전압화, 대전류화, 소형화에 상당한 진척을 보이고 있다. 특히, VI의 진공도가 저하하면 내부 압력이 증가하게 되고, 파셴 법칙(Paschen's law)에 의해 VI의 내부 절연 상태가 악화된다. 진공도에 따른 절연 파괴전압(V_s)은 다음의 수식으로 나타낼 수 있다.

여기서, P 는 압력, d 는 Gap의 길이, γ 는 2차 전자 방출 계수, C, D 는 상수를 나타낸다.

$$V_s = D \frac{PD}{\ln \left\{ \frac{CPd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right\}} \quad (1)$$

✉ Kyunguk Jang; kujang@gachon.ac.kr

Copyright ©2021 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.

또한, VI의 구조에서 전극 간 거리는 소호전압을 결정하는 요소이지만 너무 가까우면 소호전압은 낮아지고, 발생 열이 많이 발생하여 VI의 내구성을 저하시킨다 [2].

본 연구에서는 최적의 VI를 설계하기 위해서 중심 전극 거리 0/1/2/3 cm에 따른 VI의 열 발산 특성을 유한 요소법을 적용하여 해석하고 그 결과를 반영하여 온도 분포가 균일하게 분포시키기 위해서 VI의 전극구조를 개선하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 VI 실체도

그림 1은 22.9 kV 배전용 부하개폐기로 가장 많이 사용되고 있는 LBS의 외관을 보이고 있다.

그림 2는 LBS 내에 내장되어 있는 VI의 외형도를 보이고 있다. 상부전극과 하부전극 및 하우징으로 구성되어 있다.

그림 3은 VI를 열 해석하기 위해서 모델링한 구조도를 보이고 있다. 그림 2와 마찬가지로 상부전극과 하부전극 및 하우징으로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.

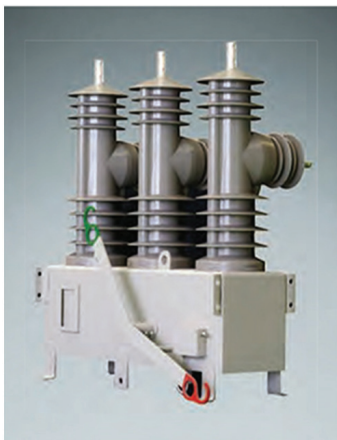


Fig. 1. LBS outside view.



Fig. 2. The image of VI.

2.2 전극거리 0/1/2/3 cm 에 따른 VI 모델링

그림 3과 같이 모델링된 VI에 대해서 식 (2)의 VI 열 해석 지배방정식을 이용하여 중심 전극거리를 0/1/2/3 cm로 변화시키면서 VI의 열 분포 해석을 진행하였다.

$$e_a \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + d_a \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (-c \nabla u - \alpha u + \gamma) + \beta \cdot \nabla u + a u = f \quad (2)$$

$$\nabla = \left[\frac{\partial}{\partial r}, \frac{\partial}{\partial z} \right]$$

여기서 u 는 원통 좌표계에서 독립변수 r, θ, z 및 t 의 종속함수, c 는 확산상수이고, a 는 열흡수 상수, f 외부 입력 온도, e_a 물질특성계수, d_a 감쇄특성계수, a 물질의 보존열 대류계수, β 물질의 열대류계수, γ 물질의 보존열특성 계수를 나타낸다. 경계 조건은 Dirichlet를 사용하였다 [3,4].

그림 4는 상부전극과 하부 전극의 거리를 0/1/2/3 cm로 변화시키면서 식 (2)의 지배 방정식을 이용하여 VI 내부에서의 발생열을 해석하기 위해서 그림 3의 VI에 대해서 유한 요소법을 이용하여 메시 해석을 한 결과를 보이고 있다 [5,6].

3. 결과 및 고찰

VI 구조에서 전극거리를 0/1/2/3 cm로 변화시키면서 VI에 대해서 유한 요소법을 적용하여 메시 해석 결과와 열 분포 해석 결과를 다음에 나타내고 있다.

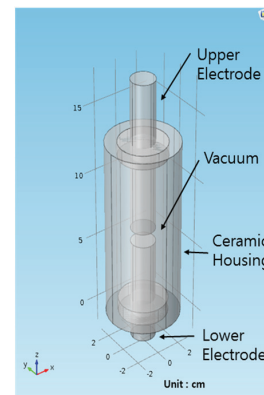


Fig. 3. Model design for the VI.

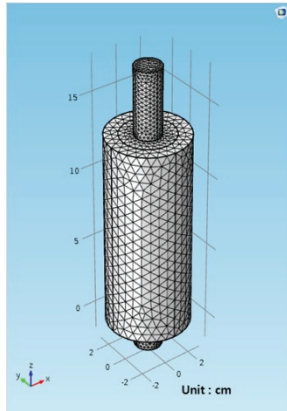


Fig. 4. Mesh analysis using FEM for the VI.

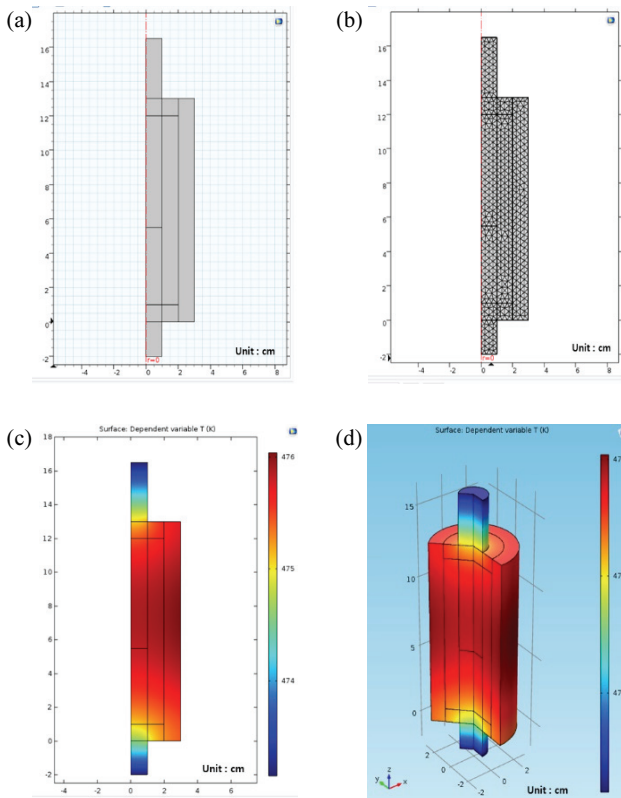


Fig. 5. Thermal flux analysis of the cross section for the center electrode distance 0 cm. (a) Cross section, (b) mesh analysis, (c) 2D thermal flux analysis, and (d) 3D thermal flux analysis.

그림 5는 중심 전극거리 0 cm에서의 메시 해석 결과와 열 해석 결과를 보이고 있다.

그림 6은 전극거리 0 cm의 VI 전단면에서 열 분포 곡선을 나타낸다. 그림 6(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 상부전극과 하부전극 사이의 중간 지점 부근에서 온도가 가장

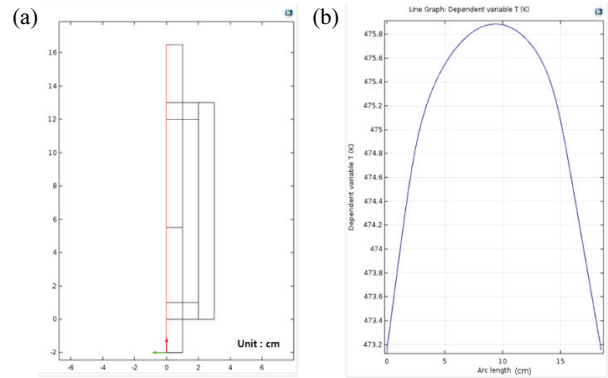


Fig. 6. Thermal distribution of VI cross section. (a) Cross section and (b) thermal distribution.

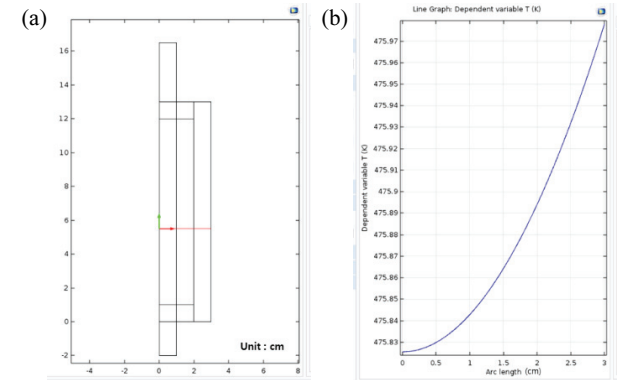


Fig. 7. Thermal distribution of VI cross section. (a) Cross section and (b) thermal distribution.

높은 475.9 K까지 올라가는 것을 확인할 수 있었다.

그림 7은 전극거리 0 cm의 VI 전단면에서 열 분포 곡선을 나타낸다. 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 중심 전극 위치에서 방사 방향으로 진행하면서 온도가 475.98 K까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 8은 중심 전극거리 2 cm에서의 열 해석 결과를 보이고 있다. 그림 8(c)에서 확인할 수 있는 바와 같이 상부전극과 하부전극 사이의 중간 부근의 방사 방향으로 하우징 끝 부분에서 온도가 가장 높은 475.98 K까지 증가하는 것을 알 수 있었다.

그림 9는 전극거리 2 cm의 VI 전단면에서 열 분포 곡선을 나타낸다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 상부전극과 하부전극 사이의 중간지점 부근에서 온도가 가장 높은 476.3 K까지 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10은 전극거리 2 cm의 VI 전단면에서 열 분포 곡선을 나타낸다. 그림 10에서 보는 바와 같이 중심위치에서 방사 방향으로 전단면에 대해서 온도가 476.36 K까지

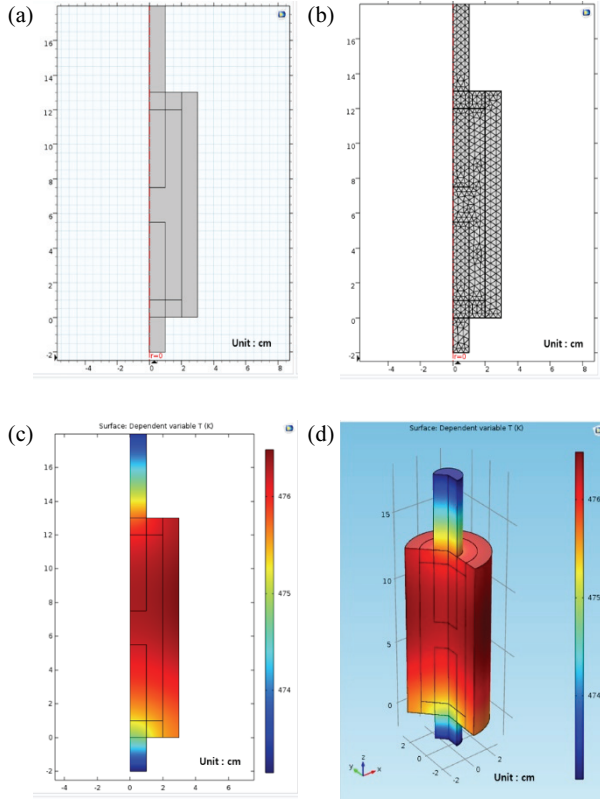


Fig. 8. Thermal flux analysis of the cross section for the center electrode distance 2 cm. (a) Cross section, (b) mesh analysis, (c) 2D thermal flux analysis, and (d) 3D thermal flux analysis.

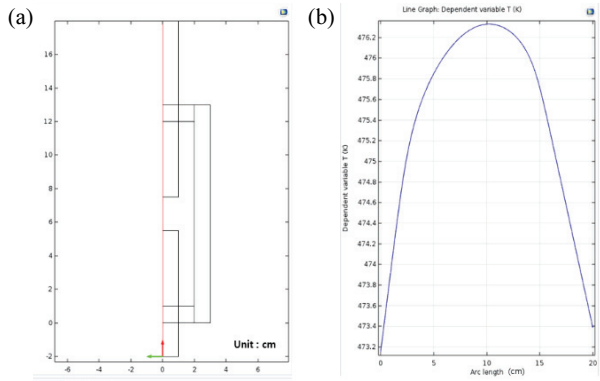


Fig. 9. Thermal distribution of VI cross section. (a) Cross section and (b) thermal distribution.

증가하는 것을 확인할 수 있었다.

표 1은 VI 중심 전극거리가 0/1/2/3 cm로 변화함에 따라서 그림 6과 그림 9에서 보는 바와 같이 중심부의 최고 온도를 나타낸다. 전극거리가 증가할수록 중심 온도가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 전극거리가 늘어나면

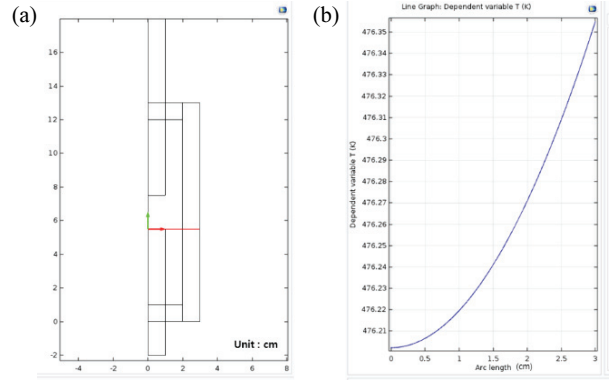


Fig. 10. Thermal distribution of VI cross section. (a) Cross section and (b) thermal distribution.

Table 1. Maximum temperature on the center axes.

Center electrode distance [cm]	Maximum temperature [K]
0	475.9
1	476.1
2	476.3
3	476.5

Table 2. Maximum temperature on the center radial axes.

Center electrode distance [cm]	Radial maximum temperature [K]
0	475.98
1	476.19
2	476.36
3	476.55

소호전압이 높아지면서 열 발산이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

표 2는 VI 중심 전극거리가 0/1/2/3 cm로 변화함에 따라서 그림 7과 그림 10에서 보는 바와 같이 중심부에서 방사상으로는 최고 온도를 나타낸다. 전극거리가 증가할수록 중심 온도가 늘어나는 것을 확인할 수 있다. 전극거리가 늘어나면 소호전압이 높아지면서 열 발산이 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 중심 전극거리가 늘어나면 날수록 온도가 증가하기 때문에 가이드 또는 쉴드 전극의 면적을 넓게 해야 하는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 최적의 VI를 설계하기 위해서 중심 전극거리 0/1/2/3 cm에 따른 VI의 열 발산 특성을 유한 요소법을 적용하여 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) VI 중심 전극거리가 증가함에 따라서 중심부의 최고 온도가 증가하는 것을 확인하였다.
- 2) 중심부의 온도가 증가하는 것을 보완하기 위해서는 중심부 전극 주변에 가이드 전극 또는 실드 전극을 설치해야 할 것으로 판단된다.
- 3) 중심부의 전극거리가 증가함에 따라서 실드 전극의 면적도 확대해야 할 것으로 판단된다.

ORCID

Kyunguk Jang

<https://orcid.org/0000-0002-0599-8370>

REFERENCES

- [1] C. L. Bak, A. Borghetti, J. Glasdam, J. Hjerrild, F. Napolitano, C. A. Nucci, and M. Paolone, *Electr. Power Syst. Res.*, **156**, 35 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2015.10.024>]
- [2] R. Todorović, D. Škatarić, Z. Bajramović, and K. Stanković, *Vacuum*, **123**, 111 (2016). [DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epr.2017.11.010>]
- [3] Altsoft, *COMSOL Multiphysics Guide*, <http://www.comsol.com> (2010). [DOI: [https://doi.org/10.1016/S1350-4789\(10\)70335-4](https://doi.org/10.1016/S1350-4789(10)70335-4)]
- [4] H. S. Kim and K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **31**, 521 (2018). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2018.31.7.521>]
- [5] K. U. Jang, *J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng.*, **28**, 403 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.4313/JKEM.2015.28.6.403>]
- [6] K. U. Jang, *Inst. Korean Electr. Electron. Eng.*, **23**, 793 (2019). [DOI: <https://doi.org/10.7471/ikeee.2019.23.3.793>]