

# 진공인터럽터의 내전압 성능 향상을 위한 전류컨디셔닝 기법 연구

차영광, 이일회, 전기범, 장지훈, 주흥진 

(주)비츠로이엠 기술연구소

## Study on Current Conditioning Process for Improving Withstand Voltage Performance of Vacuum Interrupter

Young-kwang Cha, IL-Hoi Lee, Ki-Beom Jeon, Ji-Hoon Jang, and Heung-Jin Ju

R&D center, VITZROEM Co., LTD., Ansan 21999, Korea

(Received June 16, 2022; Revised July 1, 2022; Accepted July 5, 2022)

**Abstract:** As a process to improve the insulation performance of VIs (Vacuum Interrupters), AC voltage conditioning is generally adopted by many manufacturers. Although the insulation performance is enhanced easily with AC Voltage conditioning, it has limitations when high recovery voltage is required due to high voltage rate or capacitive current switching. In particular, impurities such as oxides segregated on the electrode surface can be removed not by the energy level of the voltage conditioning but by the higher energy level achieved by the current conditioning process. In this article, the current conditioning was carried out in various conditions and its validity was examined. The current conditioning was processed by changing the amplitude of applied current, arc time, the number of tests, and frequency. The insulation performance and the status of contact surface were checked as well. We concluded that as the applied charge quantity and the conditioning coverage area increase, the conditioning effect is much higher.

**Keywords:** Insulation performance, Vacuum interrupter, AC voltage conditioning, Current conditioning, Contact

### 1. 서론

진공인터럽터는 고진공의 우수한 절연 및 아크소호 능력으로 38 kV 이하 정격전압의 차단기에 폭넓게 사용되고 있으며, 최근 72.5 kV 이상의 초고압 차단기에도 적용되고 있다 [1,2]. 일반적으로 정격전압이 증가할수록 갭 길이를 증가시켜 진공인터럽터의 절연성능을 확보하고 있으나, 진공의 절연내력은 전극간 갭 길이의 증가에 따라 점차 포화되기 때문에 단지 갭 길이의 증가만으로 절연성능을 향상시키기에는 한계가 있다 [3].

✉ Heung-Jin Ju; [hju@vitzrotech.com](mailto:hju@vitzrotech.com)

Copyright ©2022 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.

기계가공에 의해 제작된 진공인터럽터의 전극은 미세적으로 표면에 미세하게 돌출된 부분 및 표면에 부착되어 있는 산화물 등에 의해 내전압 성능이 불안정해진다. 따라서, 내전압 성능을 향상시키고, 안정화시킬 목적으로 전압 또는 전류에 의해 이와 같은 불순물 등을 제거하고 있으며, 이러한 공정을 컨디셔닝이라고 한다. 진공인터럽터의 컨디셔닝은 다양한 방법이 적용되고 있으나, 전압컨디셔닝(spark conditioning), 임펄스컨디셔닝(impulse voltage conditioning), 전류컨디셔닝(current conditioning)이 주로 사용되고 있다 [4-8]. 전압컨디셔닝은 AC 고전압을 극간에 인가하여 높은 전계에 의해 미세한 돌출부를 제거하는 방법이며, 임펄스컨디셔닝은 낮은 전압부터 점차 요구하는 수준까지 뇌충격내전압을 인가하는 방법으로 보통 승강법으로 진행하므로 시험횟수가 수백 회 정도 소요된다. 전류컨디셔닝은 대전류를 흘려보내 전극표면에 진공

아크를 발생시켜 불순물을 제거하는 방법으로 전극표면에 동-크롬 박막이 형성된다.

진공인터럽터의 컨디셔닝은 제조사마다 고유의 기준을 가지고 진행하고 있으며, 보통 1~2가지의 컨디셔닝으로도 충분한 효과를 발휘할 수 있다. 그러나 전극표면에 부착된 산화물은 전압컨디셔닝 또는 임펄스컨디셔닝 정도의 에너지로는 제거할 수 없으므로 특수한 경우에 전류컨디셔닝을 적용하고 있다. 특히 최적의 컨디셔닝 조건을 찾기는 매우 어려운 상황으로 각 제조사에서는 전기적 성능검증 시험을 통해 조건을 결정하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 12 kV 50 kA 사양의 진공인터럽터를 제작하여 다양한 조건에 따라 전류컨디셔닝을 진행하였다. 이를 통해 진공인터럽터의 컨디셔닝 효과를 내전압성능의 향상여부를 통해 확인하였다.

## 2. 시험 시료제작

### 2.1 전류컨디셔닝 효과 및 조건

전극재료로 활성금속인 크롬이 함유된 재료를 사용하면, 전극표면에 부착되어 있는 산화물 등의 불순물 때문에 차단성능 또는 내전압 성능이 불안정해진다. 특히 높은 정격 전압 사양의 진공인터럽터에서 불순물에 의한 영향이 더 크게 나타난다. 따라서 일부 제조사에서는 아크에 의해 전극표면을 용융시켜 이러한 불순물을 제거하는 공정을 이용하고 있으며, 이와 같이 대전류 아크에 의해 전극 표면의 불순물이 제거되면, 다른 컨디셔닝시 보다 높은 효과를 얻을 수 있으며 보다 빨리 원하는 내전압 성능에 도달하게 된다.

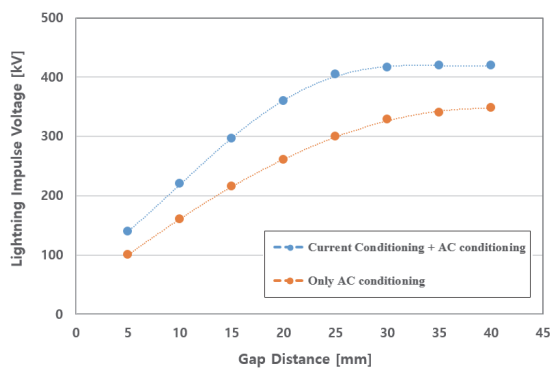


Fig. 1. Test result of lightning impulse voltage with or without current conditioning.

전류컨디셔닝 조건은 정격차단전류와 동일한 정도의 전류값을 설정하는게 바람직하지만, 이 경우 아크에 의한 전극의 손상으로 성능저하가 발생할 수 있으며 반대로 전류값을 작게 하면 그 효과가 줄어들게 된다.

전류컨디셔닝을 통해 효과를 높일 수 있는 주요 인자는 인가전류의 크기, 아크시간 및 인가횟수으로써, 진공인터럽터의 정격사양별로 적절한 조건이 선택되어야 한다. 특히, 전류컨디셔닝 방법은 종자계(axial magnetic field)를 발생시켜 아크를 제어하는 방식의 진공인터럽터에서 사용되며, 횡자계(radial magnetic field) 방식의 경우 진공인터럽터 외부에 별도의 코일을 감아 종자계를 형성시켜야 한다. 이는 종자계 방식의 경우, 확산아크가 형성되어 전극의 용융을 억제할 수 있으나, 횡자계 전극의 경우, 집중아크가 형성되므로 전극에 손상이 발생할 수 있기 때문이다.

### 2.2 진공인터럽터 및 진공차단기 제작

전류컨디셔닝의 유효성 검증을 위해 표 1과 같은 사양을 갖는 12 kV 50 kA 정격사양의 진공인터럽터를 제작하였다. 전극부는 종자계 타입으로 설계하였으며, 동-크롬 합금 접점소재를 사용하였다. 또한 진공인터럽터의 구동을 위해 진공차단기를 제작하고, 시험을 위해 그림 2와 같이

Table 1. Specification of vacuum interrupter.

Classification	Unit	Value
Rated voltage	kV	12
Rated short circuit breaking current	kA	50
Rated normal current	A	3,000
Lightning impulse voltage	kV	95



Fig. 2. Vacuum circuit breaker for testing current conditioning.

합성시험설비에 설치하였다. 진공차단기의 동작특성은 개방시간 35.7 ms, 개방속도 0.9 m/s, 스트로크 10 ms로 설정하였으며, 전류컨디셔닝은 전극 개극시 아크에 의해 전극표면의 불순물을 제거하는 것이므로 투입과 관련된 동작특성은 무시하였다.

### 2.3 간이합성시험 준비

전류컨디셔닝을 위해서는 보통 수십 kA까지의 전류를 발생시켜야 하므로 특별한 설비가 필요하다. 본 연구에서는 간이합성시험설비(simplified synthetic testing facility)를 이용하여 전류컨디셔닝을 진행하였다. 간이합성시험설비는 그림 3 및 그림 4와 같이 단락전류를 만들어 낼 수 있는 전류원과 차단 후 극간에 인가되는 과도회복전압을 만들 수 있는 전압원으로 구성되어 있다. 본 연구는 사고전류 차단이 목적이 아니므로 전압원은 사용하지 않았으며, 커패시터에 충전된 전류원 전류만 사용하였다. 특히 전류원 전류는 커패시터에 충전된 전류를 출력으로 보



Fig. 3. Synthetic test facility.

내주므로 1/2 cycle마다 전류값이 약 10% 정도씩 감소하게 되며, 진공인터럽터는 최초 전류영점에서 대부분 전류를 차단할 수 있으므로 최초 반파 전류만 활용하였다. 그림 5는 합성시험설비의 주파수 가변을 위해 커패시턴스, 리액턴스 및 션트저항(Shunt resistance)값을 인가하여 전류파형을 모의한 것으로써, 실제 회로소자를 적용하여 합성시험설비에서 발생된 전류와 비교시 약 17% 정도의 오차가 발생됨을 확인하였다.

## 3. 전류컨디셔닝 시험 및 결과

### 3.1 1차 전류컨디셔닝 시험

#### 3.1.1 1차 전류컨디셔닝 시험조건

전류컨디셔닝의 주요 인자는 보통 시험횟수, 인가 전류 크기, 아크시간, 주파수, 개방속도, 스트로크 등이 있으나, 본 연구에서는 인가전류의 크기, 아크시간, 주파수, 시험횟수만 선정하였다. 1차 시험의 조건은 표 2와 같으며, 3대의 진공인터럽터에 대해 각각 다른 조건으로 전류컨디셔닝을 진행하였다.

#### 3.1.2 1차 전류컨디셔닝 시험결과

전류컨디셔닝 완료 후, 시료를 분해하여 내부 전극의 상태를 확인하였다. 그림 6에서 보인 것처럼 먼저 V.I #1 시료의 경우, 음극점(cathode spot)들의 반발력에 의해 컨디셔닝된 영역이 80% 정도로 높았으나, 전극의 한쪽 방향에 심한 용융흔적이 확인되었다. 이는 진공차단기의 전원 인가부 / 주회로부(진공인터럽터) / 접지부로 이어진 통전 경로가 그림 7과 같이 'c'자의 형태로 구성됨에 따라 높은 전류에 의한 전자반발력이 작용하여 진공아크가 주로 전

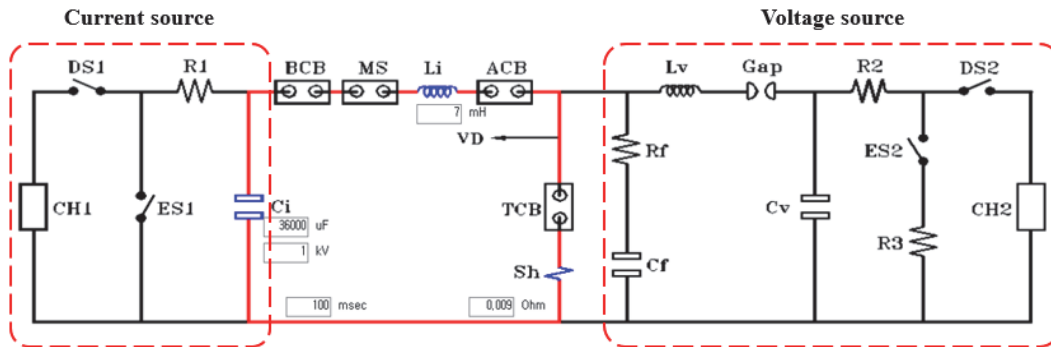
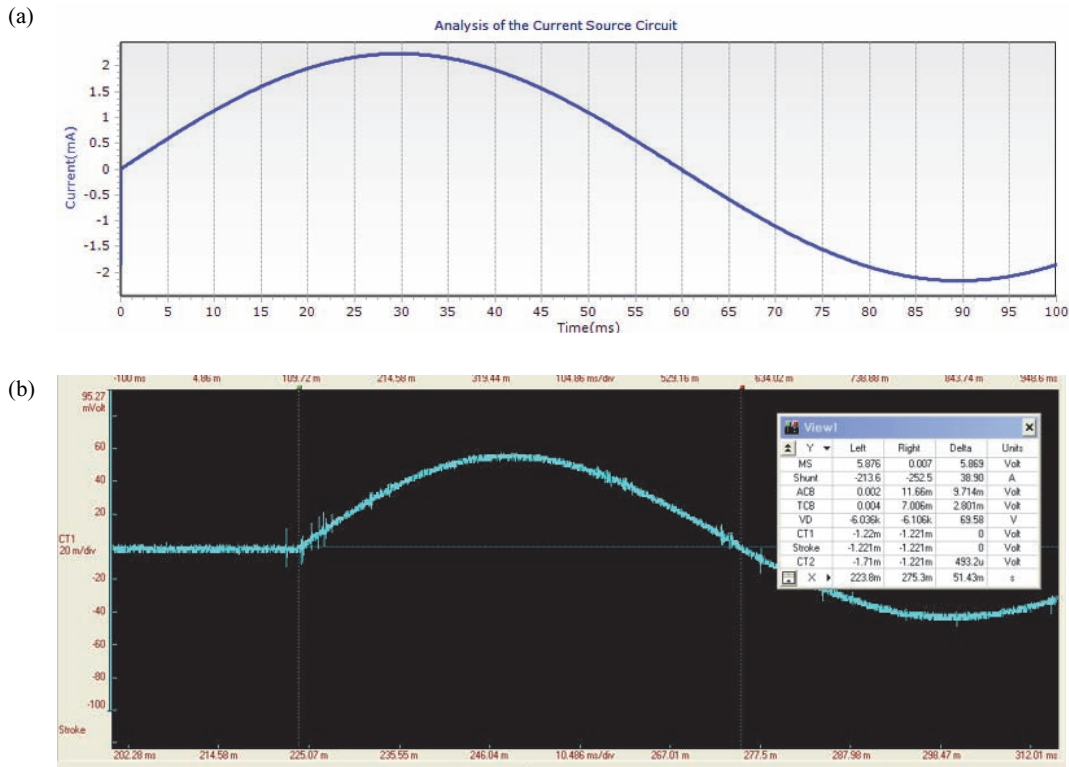


Fig. 4. Circuit diagram of synthetic test facility.



**Fig. 5.** Simulated and measured current waveform after applying circuit element. (a) Simulated current waveform (8.3 Hz) and (b) current waveform generated by synthetic test facility (9.7 Hz).

**Table 2.** 1<sup>st</sup> test condition of current conditioning.

Test sample	Applied current (kA.rms)	Arc time (ms)	No. of cycles (in both directions)	Frequency (Hz)
V.I #1	35	8.3	20	60
V.I #2	1.8	50	30	10
V.I #3	1.8	50	60	10

극의 한쪽 방향으로 쏠리는 현상이 발생되기 때문이다. 나머지 두 시료는 각각 약 40%, 50% 정도의 영역만 컨디셔닝이 된 것을 확인하였다. 동일 조건에서 횡수를 2배로 하였으나, 컨디셔닝된 영역이 거의 유사한 원인은 진공아크가 동일한 지점에서 발생되어 컨디셔닝 영역이 중첩된 것으로 추정된다.

다음으로 시험조건별 인가된 아크에너지 및 전하량을 다음의 식을 이용하여 계산하였다.

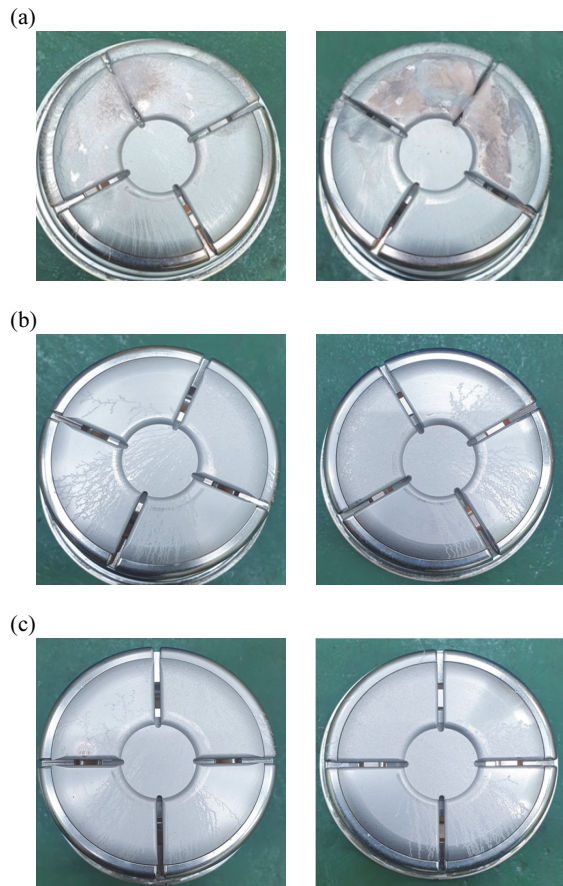
$$\text{Arc energy } (W) = \int_0^T i^2 R dt \quad (1)$$

$$\text{Charge quantity } (Q) = \int_0^T i dt \quad (2)$$

여기서,  $i$ 는 인가전류로써  $i_{peak} \sin(2\pi ft)$ 이며,  $T$ 는 아크타임이다. 아크에너지 계산시 아크저항( $R$ )은 1로 산정하였다. 그림 6의 전극표면의 상태와 표 3의 아크에너지 및 전하량을 비교해보면 V.I #1의 조건이 매우 가혹한 것을 알 수 있으며, 전극표면의 컨디셔닝 영역은 아크에너지 및 전하량 모두의 영향을 받는 것으로 추정된다.

**Table 3.** Comparison of target values and test result values for 1st current conditioning.

Test sample	Target value		Test value	
	Arc energy (MJ)	Charge quantity (C)	Arc energy (MJ)	Charge quantity (C)
V.I #1	204.2	5,250	210.3	5,300
V.I #2	4.86	2,430	6.3	2,794
V.I #3	9.72	4,860	9.5	4,806

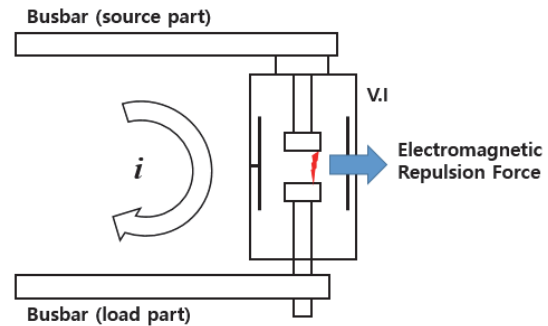


**Fig. 6.** Contact after 1st current conditioning test. (a) V.I #1 (left : fixed contact, right : movable contact), (b) V.I #2 (left : fixed contact, right : movable contact), and V.I #3 (left : fixed contact, right : movable contact).

### 3.2 2차 전류컨디셔닝 시험

#### 3.2.1 2차 전류컨디셔닝 시험조건

2차 시험은 1차 시험결과에서 도출된 문제점을 개선하기 위해 다른 조건으로 시험을 진행하였다. 60 Hz 조건에서는 접점의 손상을 줄이기 위해 인가전류를 낮추고 시험횟수를 늘렸으며, 10 Hz 조건에서는 컨디셔닝된 영역을 넓히기 위해 전류를 소폭 상승시켰으며, 시험횟수를 증가시



**Fig. 7.** Electromagnetic repulsion force of vacuum interrupter.



**Fig. 8.** Photograph of voltage conditioning.

켰다. 특히 V.I #3 시료의 경우, 전자반발력에 의한 컨디셔닝 영역의 편중 현상을 막기 위해 각 40회 시험시마다 진공인터럽터를 120°씩 회전시켜 전자반발력의 영향이 골고루 미치도록 하였다. 2차 시험 조건 및 1차 시험과의 비교를 표 4 및 5에 나타내었다.

#### 3.2.2 2차 전류컨디셔닝 시험결과

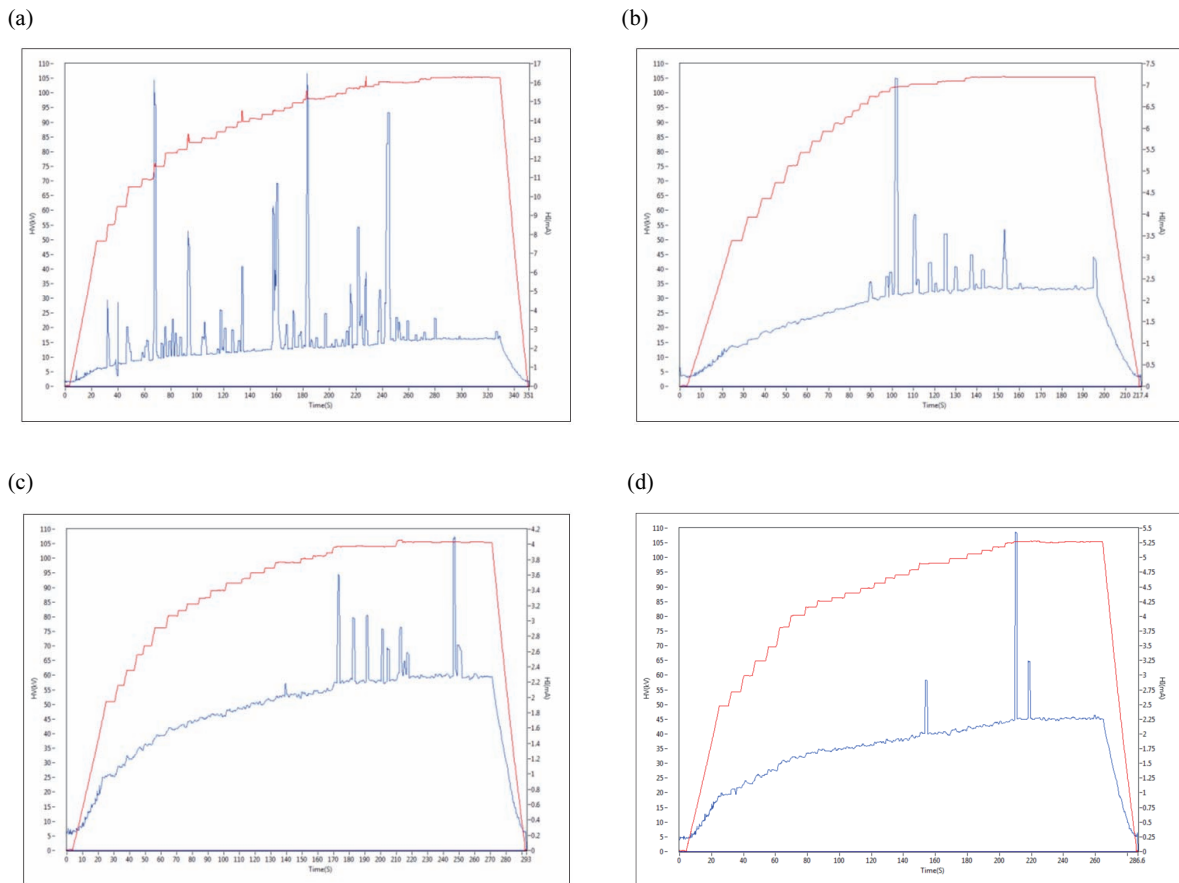
전류컨디셔닝 이후 내전압 성능을 확인하였다. 먼저 그림 8과 같이 전압컨디셔닝을 추가로 실시하여 누설전류의 발생량을 비교하였다. 전압컨디셔닝은 전극을 6 mm 이격

**Table 4.** Test condition of 2nd current conditioning.

Test sample	Applied Current (kA.rms)	Arc time (ms)	No. of cycles (in both directions)	Frequency (Hz)
V.I #1	25	8.3	30	60
V.I #2	2.2	50	120	10
V.I #3	2.2	50	120	10

**Table 5.** Comparison of arc energy and charge quantity for 1st and 2nd test conditions.

Test sample	1st test condition		2nd test condition	
	Arc energy (MJ)	Charge quantity (C)	Arc energy (MJ)	Charge quantity (C)
V.I #1	204.2	5,250	156.2	5,630
V.I #2	4.86	2,430	29.0	11,800
V.I #3	9.72	4,860	29.0	11,800



**Fig. 9.** Voltage and current waveforms on voltage conditioning with or without current conditioning. (a) W/o current conditioning, (b) w-current conditioning (V.I #1), (c) w-current conditioning (V.I #2), and (d) w-current conditioning (V.I #3).

시키고, 105 kVrms 전압을 인가하는 조건으로 모든 시료에 동일하게 적용하였다. 전압컨디셔닝 결과, 그림 9에서 보인 것처럼 V.I #2와 V.I #3의 시료에서 누설전류가 비교적 작았는데, 이는 해당 시료의 전류컨디셔닝이 잘 진행되어 전극표면의 불순물이 상당부분 제거된 것으로 판단된다. 전류컨디셔닝을 실시하지 않은 경우에는 낮은 전압부터 누설전류가 많이 발생하였으며, 특히 전극표면의 돌기 등 불순물의 영향으로 방전이 발생하는 횟수가 매우 많았다.

절연시험은 뇌충격내전압시험만 진행하였으며, 어떠한 컨디셔닝도 실시하지 않은 시료, 전압컨디셔닝만 실시한 시료, 전류컨디셔닝 및 전압컨디셔닝 모두를 실시한 시료를 비교하였다. 먼저 컨디셔닝 유무에 따른 절연시험 결과, 그림 10과 같이 전류컨디셔닝까지 실시한 시료는 어떤 컨디셔닝도 실시하지 않은 시료에 비해 높은 절연성능을 보였으며, 빠르게 내전압 성능이 안정화되었다. 이러한 현상

은 정극성/부극성 시험 모두에서 확인되었는데, 여러가지 컨디셔닝을 진행함으로써 내전압 성능을 더욱 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다. 다음으로 전류컨디셔닝 조건을 달리한 경우, 그림 11과 같이 V.I #3 시료의 내전압 성능이 소폭 더 높은 것으로 확인되었다.

절연시험 이후, 진공인터럽터를 절단하여 접점상태를 확인하였다. 높은 전류가 인가된 V.I #1 시료의 경우에는 약 68%의 영역이 컨디셔닝 되었으며, 1차 시험과 마찬가지로 접점 용융 흔적이 확인되었다. 또한 전자반발력에 의해 컨디셔닝이 한쪽 부분으로 편중되어 진행되었다. V.I #2 시료의 경우, 컨디셔닝된 영역은 소폭 커졌으나 이 역시 일부 영역에 편중된 현상을 보였다. V.I #3 시료는 약 85% 정도의 컨디셔닝된 영역을 보였으며 전체적으로 균일하게 컨디셔닝이 진행되었다.

인가된 에너지 및 전하량, 컨디셔닝된 영역, 절연시험 결과를 종합할 때, 높은 에너지의 인가는 점점의 손상을 유발

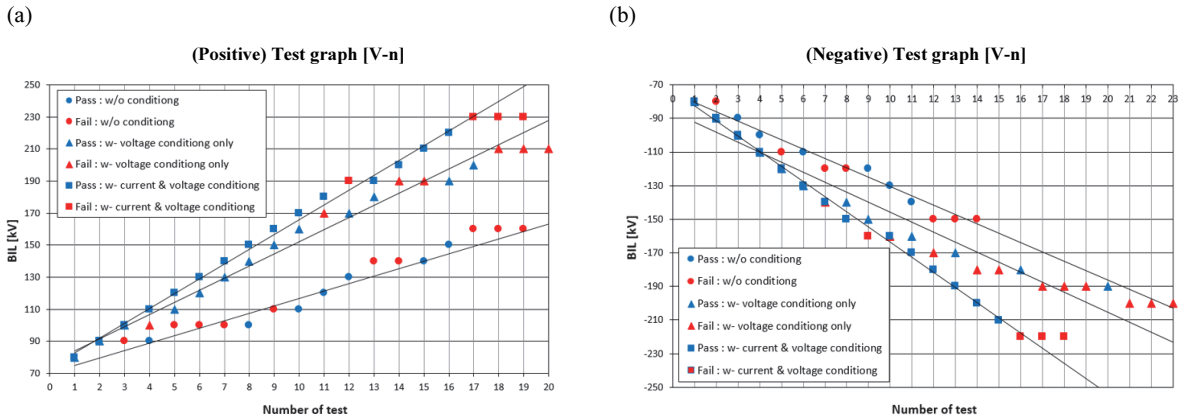


Fig. 10. Test results of lightning impulse test with or without conditioning. (a) Positive polarity test and (b) negative polarity test.

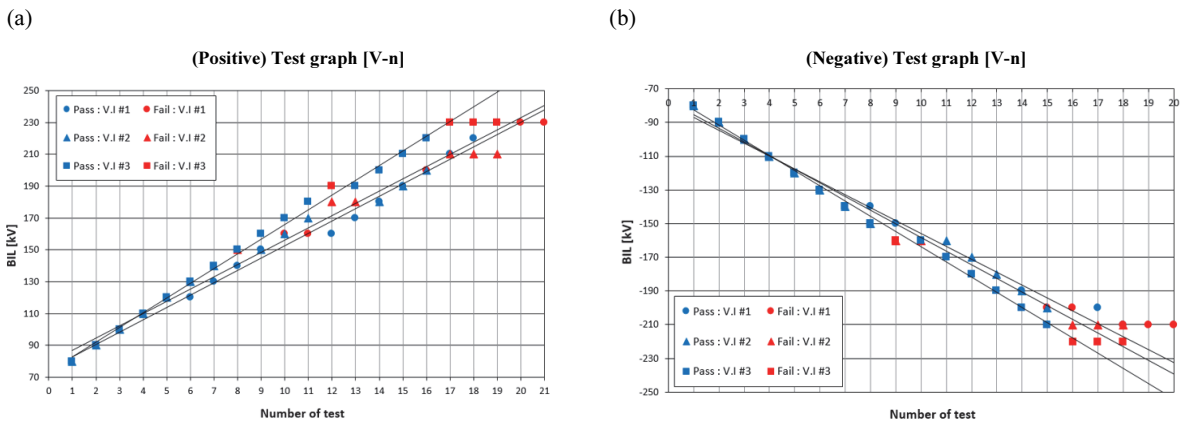
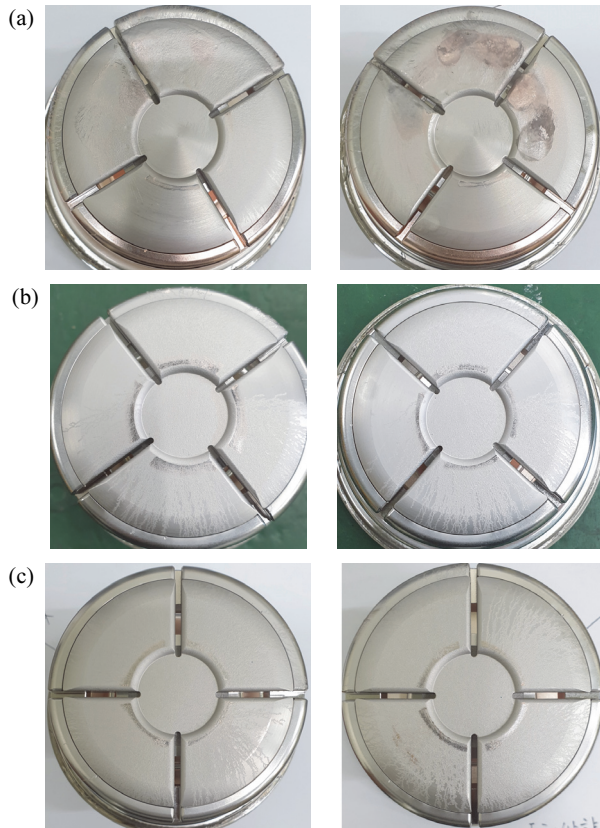


Fig. 11. Test results of lightning impulse test according to condition of 2nd current conditioning. (a) Positive polarity test and (b) negative polarity test.



**Fig. 12.** Contact after 2nd current conditioning test. (a) V.I #1 (left : fixed contact, right : movable contact), (b) V.I #2 (left : fixed contact, right : movable contact), and (c) V.I #3 (left : fixed contact, right : movable contact).

하여 오히려 절연성능을 약화시킬 수 있으며, 컨디셔닝 영역을 고르게 넓히고 인가 전하량을 늘리면 절연성능을 향상시킬 수 있을 것으로 판단한다.

#### 4. 결론

12 kV 50 kA 정격사양의 진공인터럽터를 제작하고, 다양한 조건에서 전류컨디셔닝을 진행하여 내전압 성능의 향상여부를 확인하였다. 전류컨디셔닝의 조건으로 인가전류의 크기, 아크시간, 주파수, 시험횟수를 주요 인자로 선정하였고 조건을 변화시켜가며 시험을 진행하였다. 시험결과, 전극표면에 컨디셔닝된 영역이 넓을수록 진공인터럽터의 내전압 성능을 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 특히 컨디셔닝된 영역을 넓히기 위해서는 전극의 손상이 발생되지 않을 정도의 낮은 전류, 긴 아크시간 및 많은 시험횟수가 요구되며, 진공인터럽터의 방향을 회전시켜 전자반발력에 의한 영향을 고르게 미치도록 하는게 중요하다. 또

한 추가적인 컨디셔닝을 같이 병행할 때 내전압 성능을 더욱 향상시킬 수 있다.

현재 진공인터럽터의 전류컨디셔닝은 제품마다 다른 조건이 사용되고 있으며, 반복적인 시험을 통해 그 조건을 설정하고 있어 많은 시간과 비용이 소요되고 있다. 향후 추가적인 연구를 통해 모든 제품에 공통적으로 적용될 수 있는 조건을 확보할 예정이다.

#### ORCID

Heung-Jin Ju

<https://orcid.org/0000-0002-5805-6045>

#### 감사의 글

본 연구는 2019년 산업통상자원부 에너지기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구(과제번호:20192910100080)로서, 관계부처에 감사드립니다.

#### REFERENCES

- [1] M. S. Agarwal, *26th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insulation in Vacuum* (IEEE, Mumbai, India, 2014) p. 437. [DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2014.6961713>]
- [2] Y. Zhang, X. Yao, Z. Liu, Y. Geng, and Ping Liu, *IEEE Trans. On Plasma Sci.*, **41**, 2034 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.1109/TPS.2013.2275641>]
- [3] M. Kurrat, S. Giere and U. Schümann, *Proc. 13th Int. Symp. on High Voltage Eng.* (Delft, Netherlands, 2003), p. 17.
- [4] S. Lagotzky, H. Schellekens, A. Papillon, and G. Müller, *Proc. 27th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insulation in Vacuum* (IEEE, Suzhou, China, 2016) p. 49. [DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7748672>]
- [5] N. Marconato, A. De Lorenzi, N. Pilan, P. Bettini, A. Lawall, and N. Wenzel, *Proc. 27th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insulation in Vacuum* (IEEE, Suzhou, China, 2016) p. 41. [DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7748670>]
- [6] H. Yang, Y. Geng, Z. Liu, Xiaoshe Zai, and Chaoran Wang, *Proc. 25th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insulation in Vacuum* (Tomsk, Russia, 2012) p. 64. [DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2012.6412451>]
- [7] X. Godechot, S. Chakraborty, A. Papillon1, B. Berthon, and C. Triaire, *Proc. 27th Int. Symp. on Discharges and Electr. Insulation in Vacuum* (IEEE, Suzhou, China, 2016) p. 577. [DOI: <https://doi.org/10.1109/DEIV.2016.7763981>]
- [8] P. G. Slade, *The Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application* (CRC Press, New York, 2008) p. 235.