

## 저압용 전기전자기기에 부분방전시험의 적용을 위한 기초연구

### A Basic Study on the Application of Partial Discharge Test on Low-voltage Electrical and Electronic Devices

길경석<sup>1,a</sup>, 송재용<sup>1</sup>, 문승보<sup>1</sup>, 차명수<sup>1</sup>, 황돈하<sup>2</sup>, 강동식<sup>2</sup>

(Gyung-Suk Kil<sup>1,a</sup>, Jae-Yong Song<sup>1</sup>, Seung-Bo Moon<sup>1</sup>, Myung-Soo Cha<sup>1</sup>, Don-Ha Hwang<sup>2</sup>, and Dong-Sik Kang<sup>2</sup>)

#### Abstract

This paper deals with the application of a partial discharge (PD) test on low-voltage electrical and electronic devices, which is recently being accepted as a non-destructive and an effective dielectric test method. A comparative analysis combined with the Withstand Voltage Test (WVT) specified in IEC standards was carried out on low-voltage insulation transformers. The results showed that the WVT causes insulation degradation of the specimen during the test by applying high voltage. However, the PD test can be performed in ranges from 30 % to 50 % of the test voltage specified in the WVT. Therefore, the PD test is successfully applicable for a non-destructive test method on low-voltage electrical and electronic devices as a replacement of the WVT.

**Key Words** : Partial discharge, Dielectric test, Withstand voltage test, Insulation degradation, Apparent charge

#### 1. 서 론

기체 절연에서와는 달리 고체 절연체의 절연과 피전압은 대단히 높기 때문에 저압용 전기전자기기와 같이 저전압 영역에서 사용되는 고체 절연체의 절연파괴는 그다지 문제가 되지 않았다. 이러한 이유로 부분방전시험은 고전압 사용기기를 대상으로 수행되어 왔다[1-3]. 그러나 고체 절연체가 급속하게 박막화되고 고체 절연시스템에서는 절연체 층간이나 보이드의 존재로 절연체가 허용하는 내전압보다도 훨씬 낮은 전압에서 부분방전이 발생할 수 있으며, 이러한 부분방전은 절연열화를 촉진시킨다[4-7]. 한편 저압용 전기전자기기의 절연 평가법으로 사용하는 내전압시험은 사용 전압의 5배 이상의 높은 전압을 인가하기 때문에 시험 중 절

연열화를 촉진시킬 수 있어 정확한 평가가 어렵다. 따라서 피시험체의 절연열화를 발생시키지 않는 새로운 절연평가기술의 개발이 요구된다[8-10].

이에 대해 부분방전시험은 내전압시험에 규정된 전압의 30 ~ 70 %에서 시험이 가능하므로 시험 중 절연열화가 발생하지 않을 것으로 생각되며, 부분방전에 관한 파라미터의 분석으로 절연체의 적용이나 제조상의 균일도 등 절연에 관한 많은 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 현재까지 저전압 전기전자기기에 대한 실질적인 절연평가 기준이나 특성이 명확하지 않은 실정이므로 이 분야에 연구가 필요하다.

본 연구에서는 저압용 전기전자기기에 대한 절연평가 기술로 부분방전시험을 적용하기 위하여 저압용 절연변압기에 대해 내전압시험과 같은 방법으로 에이징 후 방전 파라미터의 변화를 분석하였다. 실험 결과로부터 이들 절연변압기는 내전압 시험과 에이징 과정에서 절연저하가 발생함을 확인하였으며, 저압용 기기에 대한 부분방전의 특성과 절연평가에 적합한 부분방전시험법에 대하여도 검토하였다. 본 논문의 결과는 저압용 절연변압기

1. 한국해양대학교 전기전자공학부  
(부산시 영도구 동삼동 1)  
2. 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹  
a. Corresponding Author : kilgs@hhu.ac.kr  
접수일자 : 2006. 2. 1  
1차 심사 : 2006. 4. 26  
심사완료 : 2006. 5. 16

에 한정된 것이지만, 동일한 방법으로 각종의 저압용 전기전자기기의 절연평가에 적용할 수 있을 것으로 생각한다.

## 2. 부분방전의 발생과 검출

고체 절연체는 열적, 기계적, 전기적 스트레스에 의해 절연성능 저하나 손상이 발생할 수 있다. 열적 스트레스는 온도상승에 의한 단기간시험으로 고체절연체의 온도상승에 대한 영향을 평가할 수 있지만, 이러한 가속시험으로 열화기구가 바뀌지는 않는다[8]. 매우 짧은 기간의 기계적 스트레스는 보이드나 크랙을 만들어 낼 수 있으며, 이들 결함과 절연층간에 가해지는 전기적 스트레스는 부분방전을 발생시키고 절연열화를 촉진시킨다는 것은 이미 잘 알려져 있다. 결국, 부분방전과 관련된 파라미터의 관측은 절연평가에 중요하게 활용될 수 있다.

부분방전 펄스는 그림 1과 같은 회로로 접지하기 또는 비접지 기기에 따라 그림 1(a), (b)로 검출될 수 있으며, 비접지 기기라 할지라도 그림 1(a)의 회로를 사용하면 시험시 절연과피나 누설전류에 의해 증폭기의 손상을 방지할 수 있다.

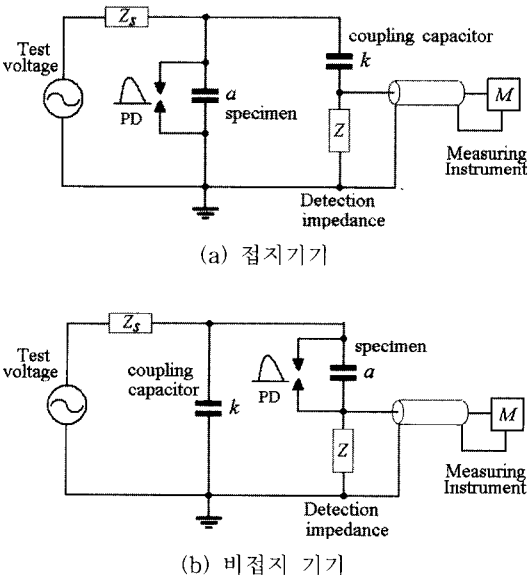


그림 1. 부분방전 검출회로.  
Fig. 1. PD detection circuits.

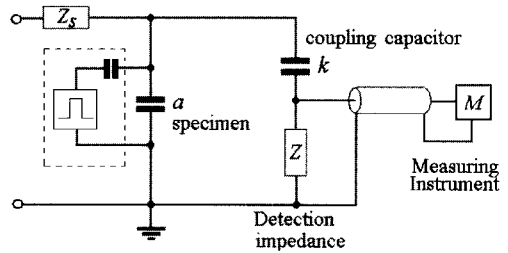


그림 2. PD 검출회로의 교정.  
Fig. 2. Calibration of the PD detection circuit.

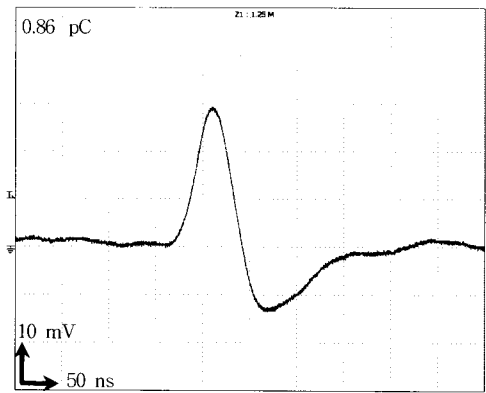


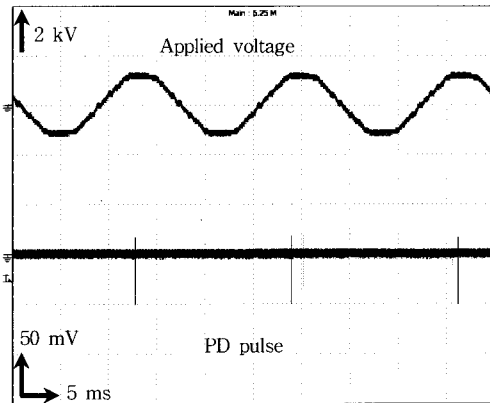
그림 3. 방전펄스의 예.  
Fig. 3. Typical PD pulse.

또한 측정 장치의 감도는 피시험체의 정전용량에 따라 달라지므로 그림 2와 같이 기지의 표준펄스를 주입하여 교정을 수행하여야 한다.

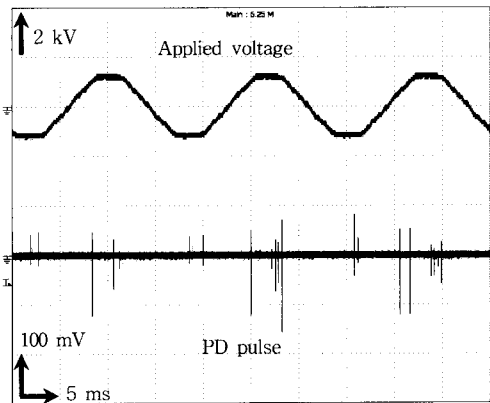
본 논문에서는 주파수 대역 500 kHz~30 MHz, 피시험체의 정전용량 2 nF 이하에서 최소 0.5 pC의 방전전하 검출이 가능한 부분방전 측정시스템을 이용하였다[13]. 저압용 절연변압기를 피시험체로 하는 교정실험에서 검출감도는 34.8 mV/pC이다. 교정실험 후 교류전압 750 V에 검출된 방전펄스 파형의 예를 그림 3에 나타내었다. 측정된 방전펄스의 크기는 0.86 pC, 상승시간은 약 30 ns이었다. 측정시스템의 잡음레벨은 3 mV<sub>p-p</sub>로 이를 방전전하량으로 환산하면 약 0.09 pC이고, 이론적으로 검출 가능한 방전펄스는 잡음레벨의 2배 이상인 약 0.18 pC이다[2].

## 3. 내전압시험과 절연체의 열화

내전압시험에 의해 절연체의 절연 저하가 발생



(a) 에이징 전



(b) 에이징 #1 후

그림 4. 에이징 #1 후 PD 펄스의 변화.

Fig. 4. Changes of PD pulses after the aging #1.

하는 가를 알아보기 위하여 내전압시험에 규정된 전압에서 일정시간 에이징 후에 방전전하의 크기와 방전개시 및 소멸전압을 비교하였다. 시험전압의 크기는 교류전압에 대한 시험이므로 IEC 60664-1에 따른 내전압시험의 전압 계산식 (1)을 기준하였다.

$$U_t = 2 \times U_n + 1000 \text{ [V]} \quad (1)$$

여기서,  $U_t$ 는 시험전압,  $U_n$ 은 피시험체의 사용전압으로 실효값을 나타낸다. 본 논문에서는 피시험체로 AC 220 V/12 V, 150 mA의 절연변압기를 사용하였으며, 에이징은 1,500 V에서 1분간(에이징 #1) 그리고 10분간(에이징 #2) 인가 후 방전 파라미터의 변화를 분석하였다.

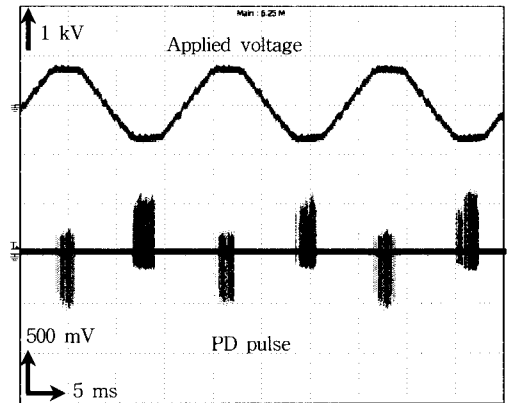


그림 5. 에이징 #2 후 PD 펄스의 변화.

Fig. 5. Changes of PD pulses after the aging #2.

그림 4는 절연변압기의 철심과 권선사이에 에이징 #1의 수행 후 방전펄스의 변화를 나타낸 것이다. 시험전압 900 V에서 에이징 전의 초기상태에서는 간헐적인 방전펄스가 관측되지만, 에이징 후에는 방전펄스의 크기와 빈도가 다소 증가하였다. 이는 피시험체가 내전압시험에 규정된 전압으로 1분간 시행하는 에이징에서 절연성능의 저하가 발생하였음을 나타내는 것이다.

그림 5는 절연변압기의 철심과 권선사이에 대해 에이징 #2 후 방전펄스의 변화를 나타낸 것이다. 에이징 #1의 결과와 비교하여 에이징 #2 후에는 더 낮은 전압인 495 V에서 방전펄스의 수와 크기가 많이 증가한 것을 알 수 있다. 마찬가지로 에이징 #2에 의해 피시험체가 열화되었음을 나타내는 것이다.

부분방전실험에 있어 절연성능 평가의 중요 지표인 방전개시전압(Discharge Inception Voltage, DIV)과 방전소멸전압(Discharge Extinction Voltage, DEV)은 그림 6에 나타낸 바와 같이 에이징 후에 감소하였으며, 이는 절연성능의 저하가 발생하였음을 의미한다. 에이징 전 초기상태에서 피시험체의 DIV는 750 V 전후였으나, 에이징 #1 후 다소 감소한 700 V 이하였으며, 에이징 #2 후에는 495 V 정도로 낮아졌다.

에이징 #1 후 방전전하량의 변화는 그림 7과 같이 인가전압에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 에이징 전에는 시험전압에 따라 완만한 증가를 보이지만, 에이징 후에는 증가폭이 크게 나타난다.

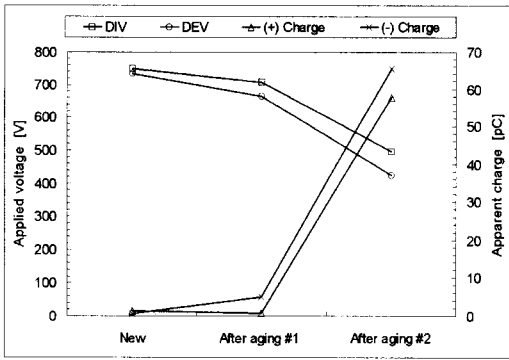


그림 6. 에이징 후 DIV, DEV와 전하량의 변화.  
 Fig. 6. Changes of DIV, DEV, and apparent charge after the ageing #1 and the ageing #2.

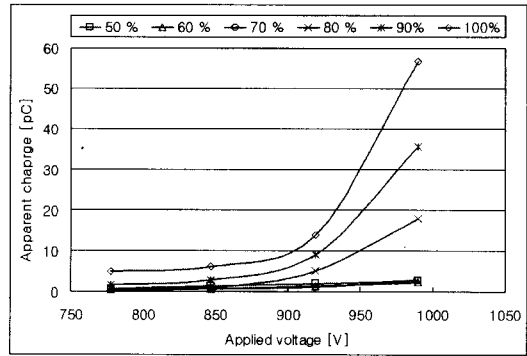


그림 8. 에이징 #2 후 인가전압에 따른 전하량의 변화.  
 Fig. 8. Changes of apparent charges as a function of applied voltage after the ageing #2.

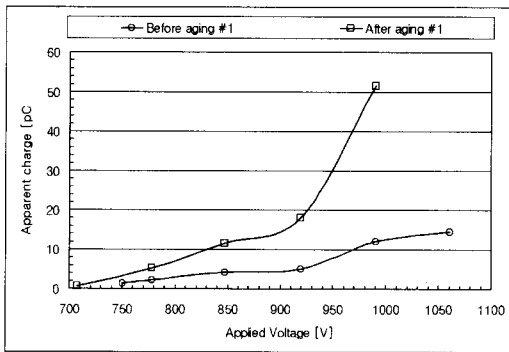


그림 7. 에이징 #1 후 전하량의 변화.  
 Fig. 7. Changes of apparent charges after the ageing #1.

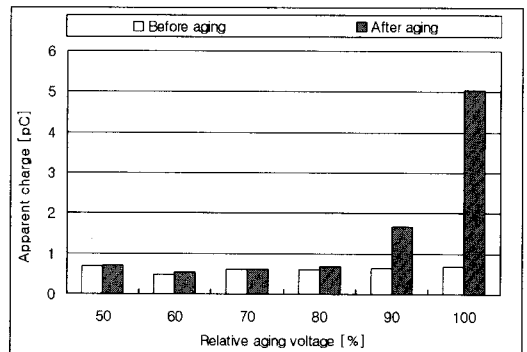


그림 9. 에이징 전후 전하량의 비교 분석.  
 Fig. 9. Comparative analysis of apparent charges before and after the aging.

특히, 900 V 이상의 전압에서는 방전전하량의 급격한 증가를 나타내는데, 이는 에이징에 의해 절연 성능의 저하가 발생하였기 때문이다.

#### 4. PD시험의 적용

실험결과로부터 저압용 전기전자기기의 절연평가법의 하나인 내전압시험에서는 피시험체에 절연 성능의 저하가 발생하는 것을 확인할 수 있었다.

저압용 전기전자기기에 대한 절연평가기술로 부분방전시험의 적용은 내전압시험에서 나타나는 절연저하를 피하기 위해 어느 정도의 시험전압이 적합한가에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 절연변압기를 6개 군으로 나누어 내전압시험 규정전압의 50% ~ 100% 까지 10% 단계마다 10분씩 인가하여 에이징 후 방전전하의 변화를 분석하였다. 그림 8과 같이 1,500 V의 70%까지는 전하량의 변화가 거의 없으나, 80% 이상에서는 시험 전압에 따라 급격히 증가하는 경향을 나타낸다.

이것은 내전압시험에 규정된 전압의 70%까지는 절연 성능에 변화가 없음을 의미하는 것이므로, 부분방전시험에서 적정 전압은 본 실험의 경우 70%인 1,050 V 이하가 적절하다. 또한 시험전압의 80%인 1,200 V에서 에이징한 경우, 870 V까지는 방전전하에 있어 변화가 없이 초기상태와 동일하

게 나타나므로 80 % 이하의 전압을 인가하는 부분방전시험에서는 피시험체에 절연 저하를 발생시키지 않을 것으로 생각한다.

그림 9는 그림 8의 결과에서 최초 검출된 방전 전하의 크기를 에이징 대상별로 나타낸 것으로 750 V ~ 770 V에서 측정된 것이다. 80 %까지는 에이징 전후 차이가 없으며, 이때의 방전전하는 1 pC 이하이다. 90 % 이상에서 에이징을 수행한 후, 방전전하량의 크기는 1.7 pC ~ 5 pC으로 현저히 증가하는 것으로 나타났다.

결국, 내전압시험에서 발생하는 피시험체의 절연저하를 피하기 위해서는 내전압 시험전압의 70 % 이하로 가능한 낮은 전압에서 방전에 관련한 파라미터의 분석해야 하며, 시험 대상별로 이와 같은 과정의 예비시험이 필요하다.

### 5. 결 론

본 논문에서는 저압용 전기전자기기에 대한 새로운 절연평가기술로 부분방전시험을 적용하기 위하여, 저압용 절연변압기에 대해 내전압 시험조건으로 에이징 후 부분방전에 관한 파라미터를 분석하였다. 실험 결과로부터 저압용 전기전자기기에 대해 절연 평가법으로 시행하는 내전압시험은 시험 중 피시험체의 절연성능을 저하시키는 것을 확인하였다.

저압용 전기·전자기기에 대한 부분방전 시험전압의 적정레벨은 시험 중 피시험체의 절연성능을 저하시키지 않는 범위로서, 이는 피시험체에 대한 에이징 실험과 전하량의 측정으로부터 산출할 수 있다. 본 논문에서 적용한 절연변압기의 경우에는 내전압시험에 규정된 시험전압의 70 %인 1,050 V 이하에서 에이징과 시험전압에 의해 절연성능의 저하가 발생하지 않으므로 부분방전 시험전압의 최대값은 1,050 V 이하가 된다. 또한 내전압 시험전압의 30 ~ 50 % 범위에서 1 pC 이하의 방전전하 측정이 가능하므로 피시험체에 절연저하를 발생시키지 않고 절연성능을 평가할 수 있다

결론적으로 저압용 전기전자기기에 대한 부분방전시험은 피시험체의 절연성능을 저하시키지 않고 절연재료의 선정과 절연 구조, 제조상 결함 등 절연에 관한 다양한 정보를 얻을 수 있으며, 반도체 소자나 PCB와 같이 절연거리가 극히 짧은 전자부품에 대한 절연 평가에도 광범위한 활용이 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

### 참고 문헌

- [1] IEC Publication 60270, High-voltage test techniques - Partial discharge measurement, 2000.
- [2] L. A. Dissado, S. J. Dodd, J. V. Champion, P. I. Williams, and J. M. Alison, "Propagation of electrical tree structures in solid polymeric insulation", IEEE Trans. on DEI, Vol. 4, No. 3, p. 259, 1997.
- [3] A. Lapp and H. G. Kranz, "The use of CIGRE data form at for PD diagnosis application", IEEE Trans. on DEI, Vol. 7, No. 1, p. 102, 2000.
- [4] A. Kelen and M. G. Danikas, "Evidence and presumption in PD diagnostics", IEEE Trans. on DEI, Vol. 2, No. 5, p. 780, 1994.
- [5] S. A. Boggs, "Partial discharge - Part III : cavity-induced PD in solid dielectric", IEEE EI Magazine, Vol. 6, No. 6, p. 11, 1990.
- [6] W. Pfeiffer, "Partial-discharge testing of components for low-voltage equipment", IEEE Trans. on DI, Vol. 31, No. 4, p. 247, 1991.
- [7] A. Mbaye, F. Grigorescu, T. Lebey, and Bui Ai, "Existence of partial discharges in low-voltage induction machines supplied by PWM drives", IEEE Trans. on DEI, Vol. 3, No. 4, p. 554, 1996.
- [8] IEC Publication 60664-1, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1 : Principles, requirements and tests, 2002.
- [9] IEC Publication 61558-1, Safety of power transformers, power supplies, reactors, and similar products, 2005.
- [10] 길경석, 송재용, 서황동, 황돈하, 강동식, 김용주, "저압 유도전동기에서 미소 부분방전 측정에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 960, 2005.