

커패시터용 MPPF의 교류전압 인가시 전기적 특성

(The Electrical Characteristics of MPPF for Capacitor Applications under AC condition)

정종욱* · 곽희로 · 박중신

(Jong-Wook Jung · Hee-Ro Kwak · Jung-Shin Park)

Abstract

This paper describes the self healing characteristics of metalized polypropylene film(MPPF) under ac condition.

PDs were generally observed at relatively low voltage, and the PDIVs were differently varied depending on the number of pre-self healing due to void defects. Several pre-self healing events took place at lower voltage than the critical breakdown voltage of PPF. Self healing mainly occurred at pin tips, wrinkle sides, and cross points of wrinkles. The applied voltage at self healing was increased with PPF thickness. The burn out area at self healing was also increased with the applied voltage and PPF thickness. The peak currents in a grounding conductor at self healing was also increased with the applied voltage.

1. 서론

현재 커패시터는 전기산업의 각 분야에서 널리 사용되고 있다. 금속증착 고분자 필름을 유전체로 사용한 커패시터의 경우, 셀프힐링 작용에 의해 전기적 특성이 크게 향상되었다. '셀프힐링'이라는 용어는 금속을 얇게 증착한 필름 상에서 발생하는 자동적인 절연회복 현상을 이르는 것으로, 독일의 Kern에 의해 최초로 사용되었으며[1]-[3], 이 현상은 고분자기술의 발달과 함께 커패시터의 에너지 밀도 및 신뢰성을 높이는 데 크게 기여하였다.

금속증착법으로 전극을 형성한 커패시터 소자는 국부결함으로 인해 유전체가 절연파괴될 경우, 결함부위의 증착금속을 순간적으로 산화·비산시켜 전기적으로 고립시킴으로써 커패시터 유닛 사고로의 진전을 억제한다[1]. 셀프힐링 발생메카니즘을 그림 1에 나타내었다.



그림 1. 셀프힐링 발생메카니즘

Fig. 1. Self healing mechanism

그림 1에 보인 바와 같이, 유전체에 결함이 존재할 경우, 이 지점에서 절연파괴가 발생한다. 절연파괴시 유전체 상에는 작은 구멍이 발생하며, 구멍 주위의 증착금속은 증발한다. 금속증착된 고분자 필름의 비산부위는 용단된 퓨즈와 같이 전기적으로 고립되어 지속적인 단락전류의 흐름을 억제한다. 이와 같은 작용에 의해 셀프힐링 과정은 완성된다. 지금까지 셀프힐링에 관해서는 셀프힐링시 발생하는 기포나 셀프힐링에 관계하는 요소 또는 금속증착 대상인 고분자 필름의 절연특성에 대한 연구가 주를 이루었으며, 보이드의 형태나 셀프힐링 발생부위에 관한 연구는 아직까지 보고되어 있지 않다. 결함은 여러 가지 형상으로 발생할 수 있으나, 일반적으로 커패시터의 권취 또는 함침과정에서 발생하는 주름이나 보이드의 형태가 가장 일반적인 결함의 형태이다.

그러므로, 본 논문에서는 셀프힐링 발생에 관계하는 파라메타들을 선정하여 교류전압 인가시 각 파라메타에 의한 금속증착 폴리프로필렌필름의 전기적 특성을 비교·분석하였다.

2. 실험

2.1. 실험장치 구성

교류전압 인가시, 금속증착 폴리프로필렌필름 (metalized polypropylene film : MPPF)의 여러 가지 형상의 보이드가 존재할 경우의 셀프힐링 특성을 알아보기 위한 실험장치를 그림 2와 같이 구성하였다.

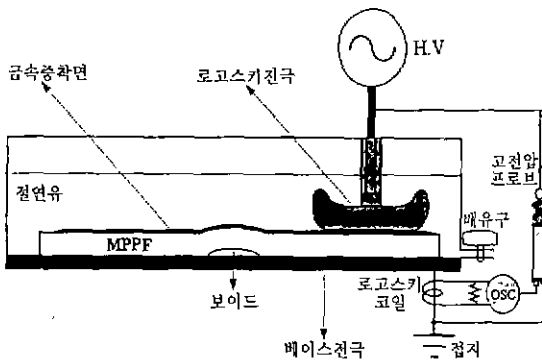


그림 2. 실험장치 구성

Fig. 2. Experimental setup

그림 2에 보인 바와 같이, 베이스전극과 금속증착 폴리프로필렌필름 간에 다양한 형상의 에어보이드를 모의하였다. 교류전압 인가 실험시, 로고스키 전극을 고전압발생장치에 접속하였으며, 베이스전극은 접지하였다. 또한, 인가전압을 측정하기 위해, 고전압 프로브를 설치하였다.

증착금속의 표면저항은 일반적으로 3~9[Ω] 정도이며, 이는 셀프힐링 발생시 증착금속의 산화·비산에 영향을 미치는 중요한 인자로서 작용한다. 증착전극의 표면저항이 증가할수록 셀프힐링시 비산면적이 증가하여 절연능력을 회복한다는 면에서는 효과적이기는 하나, 커패시턴스가 감소하므로, 결국 커패시터의 성능은 저하된다[4][8]. 이 실험에 사용한 금속증착 폴리프로필렌필름의 제원을 표 1에 나타내었다.

표 1. 시험용 금속증착 폴리프로필렌필름의 제원

Table 1. Specification of MPPF used

시험용 PPF 두께	증착금속 종류/증착두께	표면저항
5, 6, 10, 12[μm]	Al / 300[Å]	7[Ω]

셀프힐링시 증착금속의 산화·비산물 및 셀프힐링시 생성된 가스에 의해 절연유가 오염되어 절연능력이 저하되므로[1], 시료 필름을 교체할 때마다 절연유도 교환하였으며, 이를 위해 배유구를 설치하였다. 절연유로는 폴리프로필렌필름 함침용으로 생산되는 식물성 절연유(SUN OHM C)를 사용하였다. 또한, 셀프힐링시 접지선에 흐르는 전류를 측정하기 위해 접지선에 로고스키 코일을 설치하고 오실로스코프의 입력단자에 접속하였다.

2.2. 실험방법

5[μm], 6[μm], 9[μm], 12[μm] 두께의 폴리프로필렌 필름 위에 300[Å]의 두께로 금속을 증착시킨 금속증착 폴리프로필렌필름을 6×15[cm]로 재단하여 베이스전극 위에 놓고 절연유를 주입하였다. corona free 교류 고전압 발생장치를 사용하여 0.5[kV/s]의 비율로 교류전압을 인가한 후, 부분방전 개시전압 (partial discharge inception voltage : PDIV), 셀프힐링 발생시 인가전압을 측정하고, 증착전극의 비산면적 및 진행상황을 촬영하였으며, 셀프힐링시 접지선에 흐르는 전류를 오실로스코프로 기록하였다. 이와 같은 방법을 각 두께의 폴리프로필렌필름에 반복하여 한 종류의 금속증착 폴리프로필렌 필름 당 60~70회의 셀프힐링을 발생시켜 데이터를 획득하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 금속증착 폴리프로필렌필름의 셀프힐링

셀프힐링으로 인해 증착금속이 비산한 부위를 사진 1에 나타내었다.

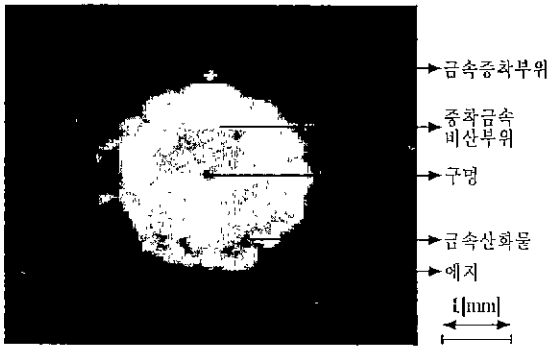


사진 1. 셀프힐링 발생시 증착금속 비산부위 및 기포 발생(12[μm], 3[kV_{ac}])

Photo. 1. Burn out of metalization and gas generated at self healing

사진 1에 보인 바와 같이, 셀프힐링으로 인해 금속증착 폴리프로필렌필름 상에는 작은 구멍이 발생하였으며, 구멍 주위의 증착금속은 비산하였다. 비산된 증착금속의 에지에는 굴곡이 형성되었으며, 비산부위의 폴리프로필렌필름 상에는 셀프힐링으로 인한 산화물이 생성되었다. 이 산화물은 Al로 증착시켰을 경우, 절연체인 Al_2O_3 이며, Zn 증착의 경우에는 반도체인 ZnO 이다[6]. 또한, 셀프힐링 발생시 전원전압이 순간적으로 감소되는 현상이 관찰되었다.

3.2. 금속증착 폴리프로필렌필름의 부분 방전 특성

금속증착 폴리프로필렌필름에 교류전압을 인가했을 경우, 폴리프로필렌필름의 절연파괴전압보다 매우 낮은 전압에서 부분방전이 발생하였으며, 경우에 따라 부분방전으로 인한 잡음이 발생하고 증착전극 비산부위의 면적이 확장되는 경우가 관찰되었다. 부분방전 개시전압은 대부분 프리 셀프힐링 발생횟수에 따라 증가하다가 프리 셀프힐링이 어느 정도 발생하면 증가 및 감소를 반복하거나 또는 메인 셀프힐링전압에 근접한 전압에서 관찰되는 경우도 드물게 발생하였다. 이는 프리 셀프힐링에 의해 가장 취약한 결함부터 제거되므로, 처음 수 회의 프리 셀프힐링이 발생하는 동안은 부분방

전 개시전압이 증가하는 것으로 생각된다. 또한, 부분방전 개시전압이 수회의 프리 셀프힐링을 거치는 동안 잔여결함까지 제거되면 메인 셀프힐링 전압까지 부분방전 개시전압이 발생하지 않는 경우도 드물게 관찰되었다. 부분방전 개시전압은 대체적으로 폴리프로필렌필름의 두께와는 무관하게 발생하였으며, 프리 셀프힐링이 발생하여 결함이 어느 정도 제거되면 폴리프로필렌필름의 셀프힐링 발생시 인가전압까지 상승하는 경향을 나타내었다.

3.3. 폴리프로필렌필름의 두께에 따른 메인 셀프힐링전압

폴리프로필렌필름의 절연파괴전압은 필름 제작 방법, 연신정도 및 시험시 환경 등의 제반조건에 따라 달리 보고되고 있으나, 일반적으로 약 0.2~0.4[kV_{ac}/ μm] 정도로 하고 있다[6]. 이 실험에서는 수 회의 프리 셀프힐링 발생 후, 금속증착 폴리프로필렌필름의 전 영역에서 셀프힐링이 동시에 다 발하기 시작하는 전압을 해당 폴리프로필렌필름 두께의 메인 셀프힐링전압으로 선정하였으며, 그 결과를 그림 3에 나타내었다.

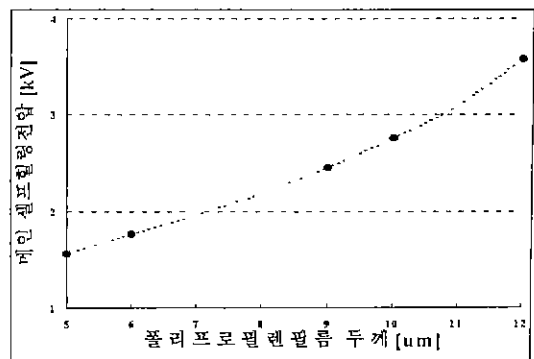


그림 3. 폴리프로필렌필름의 두께에 따른 메인 셀프힐링전압

Fig. 3. Main self healing voltage with PPF thickness

그림 3에 보인 바와 같이, 셀프힐링 발생시 인가전압은 폴리프로필렌필름의 두께에 따라 약 0.23 [kV_{ac}/ μm]의 비율로 증가하였다.

3.4. 셀프힐링 발생시 증착금속 비산면적

셀프힐링 발생시 인가전압에 따른 증착금속 비산면적을 그림 4에 나타내었다.

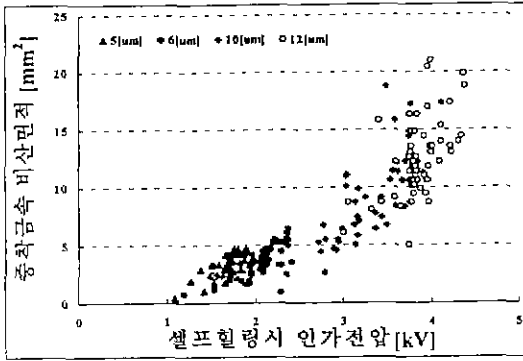


그림 4. 셀프힐링 전압에 따른 증착금속 비산면적
Fig. 4. Burn out area with applied voltage at self healing

그림 4에 보인 바와 같이, 교류전압을 인가하였을 경우, 셀프힐링 발생시 증착금속 비산면적은 셀프힐링 발생시 인가전압에 따라 거의 선형적으로 증가하였다. 이는 셀프힐링 발생시 인가전압이 폴리프로필렌필름의 두께에 따라 증가하기 때문이라고 생각된다.

3.5. 셀프힐링 발생시 접지선에 흐르는 전류

셀프힐링 발생시, 배이스전극에 접속된 접지선에 흐르는 전류의 크기를 그림 5에 나타내었다

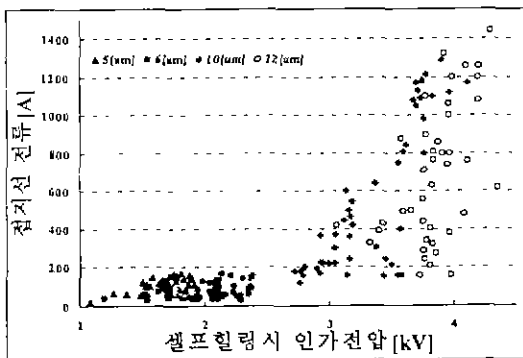


그림 5. 셀프힐링 발생시 접지선에 흐르는 전류
Fig. 5. Current in grounding conductor at self healing

그림 5에 보인 바와 같이, 셀프힐링시 접지선에 흐르는 피크전류의 크기는 셀프힐링 발생시 인가전압에 따라 증가하는 경향을 나타내었다. 10[μm]와 12[μm] 폴리프로필렌필름의 경우, 피크전류의 분포는 매우 넓었다. 또한, 이 때의 피크전류는 폴리프로필렌필름의 두께가 얇은 경우에 비해 상당히 증가하였으며, 이는 폴리프로필렌필름이 두꺼울수록 셀프힐링시 인가전압도 증가하기 때문이라고 생각된다.

그림 6에 셀프힐링 발생시 접지선에 흐르는 전류의 대표파형을 폴리프로필렌필름의 두께별로 나타내었다.

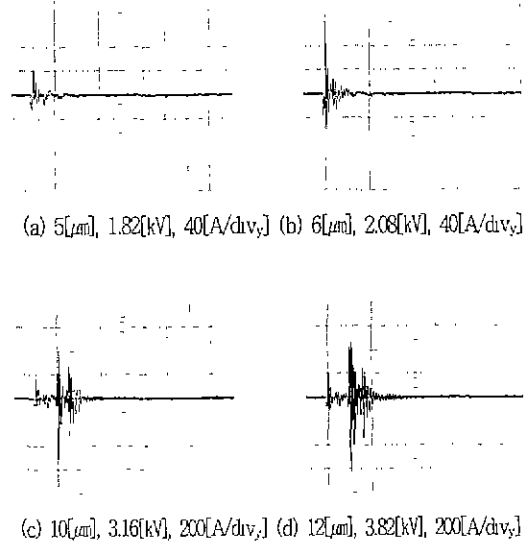


그림 6. 셀프힐링 발생시 접지선에 흐르는 전류파형 (교류전압 인가시, 1[$\mu\text{s}/\text{div}_x$])

Fig. 6. Current waveforms in grounding conductor at self healing (under a.c condition, 1[$\mu\text{s}/\text{div}_x$])

그림 6에 보인 바와 같이, 금속증착 폴리프로필렌필름에 교류전압을 인가한 경우, 셀프힐링 발생시 접지선에 흐르는 전류는 진동·감쇠하였으며, 대부분 3[μs] 이내에 소멸하는 경향을 나타내었다. 특히, 10[μm], 12[μm] 폴리프로필렌필름에서 전류피크는 다소 지연되어 발생하였다.

4. 결론

에너지 저장용 커패시터의 유전체로 사용되는 금속증착 폴리프로필렌필름에 교류전압을 인가하여 보이드 형상에 따른 셀프힐링 특성을 관찰한 후, 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 부분방전은 비교적 낮은 전압에서 발생하기 시작하였으며, 보이드 결합으로 인해 발생하는 프리 셀프힐링의 횟수가 증가함에 따라 부분방전 개시전압도 증가하는 현상을 나타내었다.
- (2) 셀프힐링 발생시 인가전압은 폴리프로필렌 필름의 두께에 따라 증가하였다.
- (3) 셀프힐링 발생시 증착금속 비산면적은 셀프힐링 발생시 인가전압에 따라 거의 선형적으로 증가하였다.
- (4) 셀프힐링 발생시 접지선에 흐르는 피크전류는 셀프힐링 발생시 인가전압에 따라 증가하였으며, 시간에 따라 진동·감쇠하여 대부분 3[μ s] 이내에 소멸하는 파형을 나타내었다. 또한, 10[μ m], 12[μ m] 폴리프로필렌필름의 경우, 전류피크가 다소 지연되어 나타났다.

참 고 문 헌

- [1] C. W. Reed and S. W. Cichanowski, "The Fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, Vol. 1, No. 5, pp. 904-922, October 1994
- [2] "Technical Trend of Capacitor Films," OHA1, pp. 36-40, October 1998.
- [3] R. Bartnikas and R.M. Eichhorn, Engineering Dielectrics-Electrical Properties of Solid Insulating

Materials : Molecular Structure and Electrical Behavior, ASTM Special Technical Publication, Vol. 11A, pp. 505-509, 1983.

- [4] D.G. Shaw, S.W. Cichanowski and A. Yializis, "A Changing Capacitor Technology-Failure Mechanisms and Design Innovations," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-16, No. 5, pp. 399-412, October 1981.
- [5] Shalabh Tandon, Modelling of Stresses in Cylindrically Wound Capacitors : Characterization and the Influence of Stress on Dielectric Breakdown of Polymeric Film, Ph.D. Thesis, University of Massachusetts Amherst, USA, pp. 3-8, September 1997.
- [6] K.S. Kim, "The Manufacture Technology in Power Condenser," *Monthly of Electrical Technology*, pp. 65-69, November 1999.
- [7] Katsurai Makoto, Illustrated Electromagnetics, Daeyoung, pp. 64-66, 1992. 12.
- [8] Yasunobu Yoshida and Takashi Muraoka, "The Development of High Voltage Power Capacitor Technology in Japan," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, Vol. 11, No.1, pp. 32-45, January/February 1995.
- [9] Y. Yoshida and M. Nishimatsu, "Power Capacitors," *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, Vol. EI-21, No. 6, pp. 963-973, December 1986.
- [10] Y. Muramoto, M. Nagao and M. Kosaki, "Self-healing breakdown of polyimide thin films in the cryogenic temperature region," *13th International Cryogenic Engineering Conference*, Vol. 35, No. 11, pp. 791-793, 1995.
- [11] J.W. Jung, K.S. Choi, H.R. Kwak and H.Y. Park, "The Self-healing Characteristics of Metalized Polypropylene Films with Voids," *Japan-Korea Joint Symposium on ED & HVE*, pp. 262-264, October 1999.

이 연구는 민군겸용기술개발사업의 일환으로 한국 전기연구소의 연구비 지원을 받아 수행되었음.