

셀프힐링 금속증착 커패시터 소체의 열화 분석

(Aging Analysis of Self Healing MPPF Capacitor Elements)

곽희로* · 송길목 · 김영찬

(Hee - Ro Kwak · Kil - Mok Shong · Young - Chan Kim)

요 약

본 논문에서는 금속증착 커패시터 소체내에서 발생하는 셀프힐링 특성을 연구 검토하였다. 커패시터에 정격전압 이상의 직류 전압으로 셀프힐링을 발생시켜 발생위치를 표정하였으며, 발생부위에 대해서는 전자주사현미경, 에너지 분산형 X선 분광기, 적외선분광기, 시차주사열량계를 사용하여, 셀프힐링 전·후 표면구조, 성분분석, 화학적 구조변화, 열적특성을 분석하였다.

실험 결과, 셀프힐링 발생시의 부산물은 주로 탄소 성분이었다. 건전시료와 셀프힐링 발생시료의 적외선 스펙트럼 분석은 유사하였으나, 500[°C]에서 열처리된 시료의 적외선 스펙트럼 분석은 서로 달랐다. 시차주사열량계 분석 결과 금속증착 폴리프로필렌필름의 건전시료와 셀프힐링 발생시료의 열량 피크는 서로 달랐다.

Abstract

This paper describes the characteristics of capacitor elements at self healing. Self healing events were forced to be created by the over-rated voltage of the capacitor elements. The self healing site was photographed by the Scanning Electron Microscope and the by-products of self healing were analyzed by the Energy Dispersive X-ray Spectrometer. Also the self healing site was analyzed by the Differential Scanning Calorimeter and the Fourier Transform Infrared Spectrometer.

As a result, the main component of by-products due to the burn out at self healing was carbon. The Fourier Transform Infrared analysis result of the self-healing specimen was similar to that of the virgin specimen, however, different from that of the specimen thermally treated at 500°C. It was observed that heat flow peaks of virgin specimen were different from self-healing specimen by the Differential Scanning Calorimeter analysis.

Key Words : MPPF Capacitor, Self-healing

1. 서 론

* 주저자 : 송실대학교 전기제어시스템공학부 교수
Tel : 02-820-0644, Fax : 02-825-7549
E-mail : hrkwak@ee.ssu.ac.kr
접수일자 : 2003년 2월27일
1차심사 : 2003년 2월28일
심사완료 : 2003년 4월10일

산업이 비약적으로 발전함에 따라 전기설비는 물론 소자의 고전압화 및 대용량화가 요구되었다. 이에 따라 고분자 유전재료 및 전극 이용기술에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재 셀프힐링 커패

시터에 많이 사용되는 금속증착 기술의 발달은 내·외부 원인으로 인한 사고발생시, 셀프힐링 작용에 의해 증착된 금속을 비산시켜 자동적으로 절연을 회복함으로써 단일사고에 의한 커패시터의 2차 사고확대의 기회를 원천적으로 예방함으로써 신뢰도 및 안정성의 향상을 가져왔다^{[1]~[2]}. 이 밖에도 금속증착 기술은 전극재료의 소요량 감소, 에너지 밀도 향상에 크게 기여할 수 있으므로, 이 기술에 대한 연구가 많은 연구자들에 의해 수행되어 왔다. 그러나 고분자 필름 상에서 발생하는 셀프힐링에 관한 연구는 커패시터의 설계 및 제작에 활용하기에는 아직 미흡한 실정이다. 특히 커패시터는 넓은 면적의 유전체층이 항상 높은 스트레스에서 사용되고 과전압이나 열적 스트레스, 사용환경 등으로 절연열화의 진전 및 절연파괴에 이를 수 있다. 커패시터의 열화원인은 전기, 화학적 열화, 열적 열화 및 기계적 열화 등으로 구분할 수 있다. 이 중 커패시터의 열화에 가장 직접적인 영향을 미치는 것은 전기, 화학적 열화로서 다른 열화의 직접 또는 간접적인 원인이 된다^{[3]~[5]}. 그러나 전기, 화학적 열화에 의한 금속증착 커패시터의 셀프힐링 특성은 아직까지 널리 알려져 있지 않다^{[6]~[8]}.

따라서 본 논문에서는 커패시터 소체에 정격전압 이상의 직류 전압을 인가하여 셀프힐링을 발생시켜 셀프힐링 발생부위에 대해 광학현미경(Optical Microscope), 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope ;SEM), 에너지 분산형 X선 분광기(Energy Dispersive X-ray Spectrometer ;EDX), 적외선분광기(Fourier Transform Infrared Spectrometer ;FTIR), 시차주사열량계(Differential Scanning Calorimeter ;DSC)를 사용하여 셀프힐링 전·후의 표면구조, 성분분포, 열적 특성, 화학적 구조변화를 분석하였다.

2. 실험 및 분석 방법

커패시터는 뇌 이상전압, 개폐서지, 사고 시 과전압 등의 원인으로 전기·화학적 열화가 발생하며, 장기적 운전이나, 과부하에 의해 열적 열화가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 커패시터 소체 내부에

서 발생할 수 있는 절연 열화 특성을 비교 분석하기 위해 직류 과전압을 이용한 전기적 열화 실험과 커패시터의 열처리에 의한 열적 열화 실험을 하였다.

본 논문에서는 유함침(oil-impregnated)된 커패시터 소체와 무함침된 소체를 선택하여 직류 과전압과 열을 가하는 방법으로 열화시켰다. 그림 1은 커패시터 소체 내에서 인위적으로 셀프힐링을 발생시키기 위한 실험장치의 개략도를 나타낸 것이다.

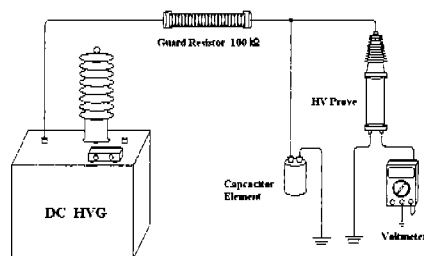


그림 1. 실험장치의 개략도
Fig. 1. Schematic diagram of experiment apparatus

본 논문에서는 DC 50[kV] 까지 전압을 인가 할 수 있는 직류 고전압 발생장치를 사용하였다. 금속증착 커패시터 소체 2~3개를 병렬 연결하여 셀프힐링을 발생시켰으며, 셀프힐링 시 전압특성을 살펴보기 위해 고전압 프로브를 통해 전압계를 연결하였다. 폴리부텐 왁스(Polybutene wax)로 봉한 무함침 커패시터와 진공처리 후 절연유를 주입하여 만든 동일 정격의 커패시터 2종류를 사용하였다. 실험에 사용한 금속증착 커패시터의 사양을 표 1에 나타내었다.

표 1. 금속 증착 커패시터 소체의 사양
Table 1. Specifications of MPPF capacitor

정격전압	증착금속 / 증착두께	커패시턴스	폴리프로필렌 두께
370[Vac]	Zn /300[Å]	25[μF]	6[μm]

커패시터 소체 내에 인위적으로 셀프힐링을 발생시키기 위해 정격전압 이상의 직류전압을 인가하였다. 무함침 커패시터에는 각각 1,100[V], 1,250[V], 1,800[V]의 직류전압을 20분간 인가하였다. 절연유에 함침된 커패시터는 1,400[V]이하에서 셀프힐링이 거의 발생하지 않았으므로, 1,550[V], 1,750[V] 전압에서

셀프힐링 발생부위를 관찰하였다. 실험 후 셀프힐링 다발 부위를 길이와 폭으로 나누어 기록하였다.

셀프힐링이 발생한 소체에 대해 금속현미경(metallurgical microscope)으로 25배 확대하여 건전시료와 비교하였다. 또한 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 셀프힐링 발생부위를 1,000배 확대하여 표면 구조의 변화를 관측하였다. Zn의 증착부분과 셀프힐링 발생부위의 성분분포는 에너지 분산형 X-선 분광분석기(EDX)의 line-scan에 의한 방법으로 성분을 확인하였다. 폴리프로필렌(polypropylene : PP)의 경우는 적외선 분광기(FT-IR)를 이용한 방법으로 건전시료와 금속증착 PP필름(metalized polypropylene film : MPPF)의 셀프힐링 된 중앙부분, 열처리에 의해 열화된 폴리프로필렌을 각각 Diamond-ATR(Attenuated Transmittance Reflection)을 이용한 직접법으로 100회 이상의 scan을 통해 얻은 스펙트럼을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 금속증착 필름의 표면 분석

그림 2는 셀프힐링 발생시 발생하는 구멍(hole)을 주사전자현미경으로 찍은 사진이다.

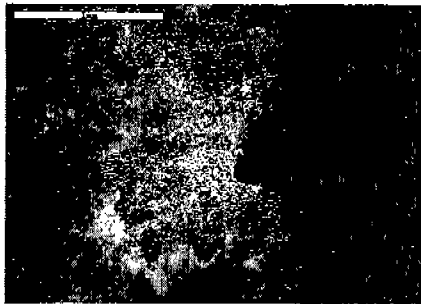
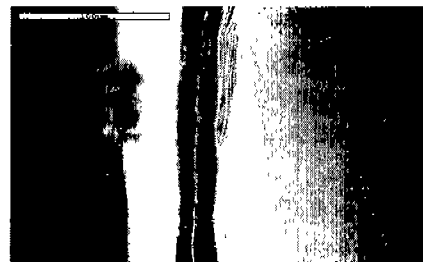


그림 2. MPPF상의 셀프힐링 발생부위
Fig. 2. Self healing spot on MPPF

그림 2에서 보인 것처럼, 금속 증착된 폴리프로필렌필름 상에는 셀프힐링에 의해 대략 수백 μm 의 작은 구멍이 발생함을 알 수 있었다. 구멍 주위의 증착된 부분은 셀프힐링 작용에 의해 비산 되었다. 결합이 존재하는 고분자 필름이 절연 파괴되면 이 필름 양

단에는 단락전류가 흐르고, 이 전류에 의해 파괴된 부위에 높은 열이 발생하여, 구멍이 발생하는 것으로 사료된다.

그림 3은 금속증착 폴리프로필렌필름 2장의 단면을 세워서 찍은 주사전자현미경 사진이다.



(a) 건전시료



(b) 셀프힐링 후의 시료



(c) 절연파괴된 시료-1



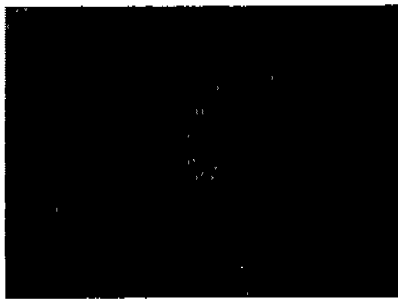
(d) 절연파괴된 시료-2

그림 3. MPPF의 단면
Fig. 3. Section surface of MPPF

셀프힐링 금속증착 커패시터 소재의 열적 분석

그림 3에서 보인바와 같이, 그림 3(a)는 MPPF의 건전시료로서 금속증착 표면이 균일함을 알 수 있다. 그림 3(b)는 셀프힐링 된 MPPF 시료로서 표면이 불균일하며 셀프힐링 시 금속증착 부분이 산화 되었음을 알 수 있었다. 그림 3(C),(D)는 절연이 파괴된 시료로서, 셀프힐링 시 커패시터 소체 내에 여러 장이 겹쳐서 셀프힐링이 발생하고, 절연이 파괴된 부위에 구멍이 발생함을 볼 수 있었다. 이는 셀프힐링 발생시 높은 열적 스트레스로 인하여 금속 증착 필름이 비산·산화되고 열적 파괴됐기 때문으로 사료된다.

그림 4는 건전시료와 셀프힐링 후의 시료를 금속현미경을 이용하여 25배 확대한 그림이다.



(a) 건전시료



(b) 셀프힐링 후의 시료

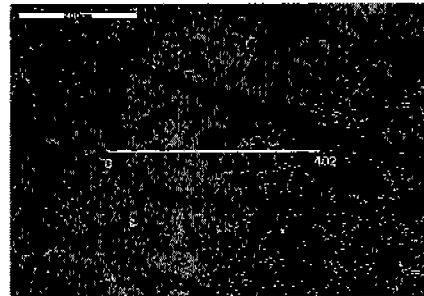
그림 4. 금속현미경에 의한 MPPF의 표면 분석
Fig. 4. Surface analysis of MPPF by metallurgical microscope

그림 4(a)는 건전시료의 표면으로 도전성분이 고르게 진공 증착되어 있는 것을 확인할 수 있었고, 그림 4(b)는 셀프힐링 된 필름으로 도전성분의 필름막

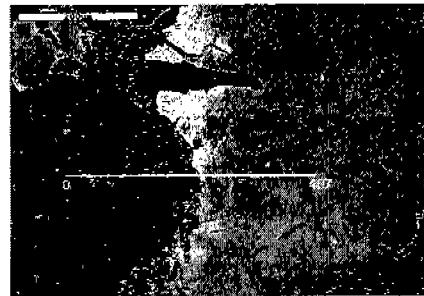
이 좌측에서 우측으로 비산된 것을 볼 수 있었다.

3.2 금속증착 필름의 성분분석

그림 5는 셀프힐링 된 금속증착필름 표면을 1,000배 확대하여 나타낸 주사전자현미경(SEM)사진이다.



(a) 건전시료



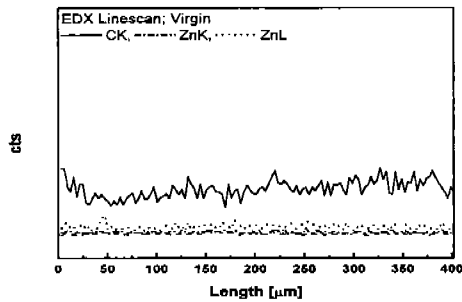
(b) 셀프힐링 후의 시료

그림 5. 셀프힐링시 MPPF의 SEM 사진
Fig. 5. SEM pictures of MPPF at self healing

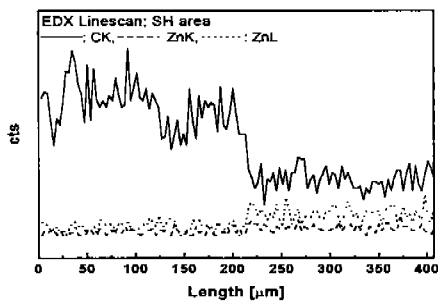
그림 5(b)에 보인바와 같이 셀프힐링 된 경계선 주변에서 비산된 도전성분이 확인되었다. 경계선 왼쪽 부분이 셀프힐링 된 부분이고, 오른쪽이 비산되지 않은 부분을 나타낸다. 그림 5에 나타난 금속증착 폴리프로필렌필름의 표면에 대한 성분분석을 분석하기 위해 에너지 분산형 X선 분광분석기(EDX)를 사용하였다.

그림 6은 라인스캔(line-scan)방법에 의해 금속증착 폴리프로필렌필름의 성분분포 분석을 나타낸 것이다. 그림에서 Y축은 카운트수를 나타내며, CK곡선은 에너지K밴드의 탄소성분, ZnK곡선은 에너지K

밴드의 아연성분 그리고 ZnL곡선은 에너지L밴드의 아연성분을 나타낸 것이다.



(a) 건전시료



(b) 셀프힐링 경계선

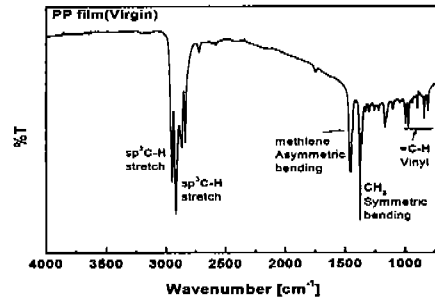
그림 6. MPPF의 성분분포
Fig. 6. Components distribution of MPPF

그림 6에서 보인바와 같이 그림 6(a)에서는 금속중착 폴리프로필렌필름에 탄소성분과 아연성분이 고르게 증착되어 있음을 알 수 있다. 그림 6(b)의 셀프힐링 된 시료는 경계선을 중심으로 좌측 부분은 탄소성분이 주를 이루고 있으며, 아연성분이 거의 나타나지 않았으며, 셀프힐링 경계선 주변으로는 성분이 불규칙한 분포를 보여준다. 그리고 경계선 우측 부분은 아연성분이 검출되었다.

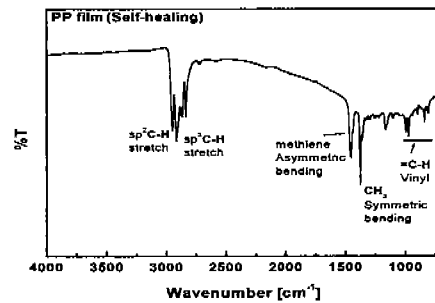
3.3 금속중착 필름의 화학적 구조변화

그림 7은 폴리프로필렌필름의 화학적 구조변화를 알아보기 위해 건전시료와 셀프힐링 된 시료 및 5 [°C/min] 으로 상온에서 500[°C]까지 승온한후, 자연 냉각 시킨 시료를 사용하였다. 분위기 가스로는 일

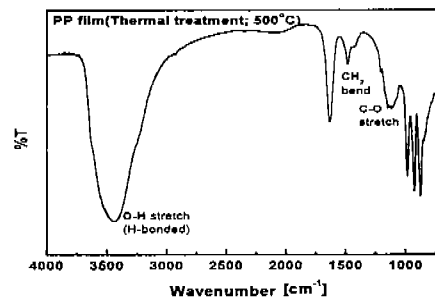
반 공기중의 상태를 표준으로 한 공기혼합가스를 사용하였으며, 100[ml/min]으로 전기로에 주입하였다. 시료는 D-ATR을 이용하여 분석하였다.



(a) 건전시료



(b) 셀프힐링 부위



(c) 500°C에서 열처리된 PP필름

그림 7. MPPF의 적외선 스펙트럼
Fig. 7. IR spectrum of MPPF

그림 7(a)의 건전시료인 경우 대칭과 비대칭의 C-H결합의 신축진동(stretch vibration)이 2949.1[cm⁻¹], 2916.9[cm⁻¹], 2866.1[cm⁻¹],

셀프힐링 금속증착 커패시터 소재의 열화 분석

2837.7[cm⁻¹]의 피크로 나타나는 것을 확인하였다. 1375.32[cm⁻¹]에서 methyl group의 대칭 굽힘진동 (symmetric bending)이 확인되었다. 그림 7(b)는 셀프힐링 부위의 적외선 스펙트럼으로 건전시료에서 분석한 스펙트럼과 거의 일치하였다.

그림 7(c)의 500[°C]에서 열처리한 커패시터 필름의 경우 3439.5[cm⁻¹]에서 중간피크(middle peak)의 O-H 신축진동이 나타나는 것을 확인하였다. 1482[cm⁻¹]에서 CH₂의 굽힘진동이 확인되었고 1205.8[cm⁻¹], 1114.9 [cm⁻¹]의 peak에서 C-O의 신축진동을 확인하였다. 그림 7(a)에서 나타난 지방족의 C-H화합물이 열처리한 필름에는 나타나지 않았지만 열영향에 의해 공기 중 산소와 결합한 O-H결합의 화합물이 나타났다. 또한, 열처리된 시료에서 C-O의 신축진동에 의한 화합물 결합이 확인된 것으로 보아 열적인 영향으로 C-H결합이나 CH₂의 결합이 O-H결합이나 C-O의 결합된 화합물로 바뀌었음을 확인할 수 있었다.

3.4 금속 증착 필름의 열분석

그림 8은 금속증착 폴리프로필렌필름의 시차주사 열량에 의한 건전시료와 셀프힐링 된 시료의 비교를 나타내고 있다.

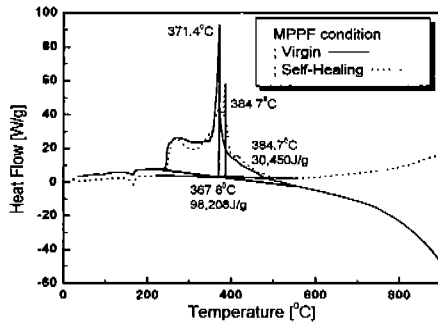


그림 8. MPPF의 시차주사열량에 의한 비교
Fig. 8. Comparison of MPPF by DSC

그림 8에서 보는 것처럼 커패시터 필름의 건전상태와 셀프힐링 된 상태를 비교한 것으로 건전시료는 열량이 371.4[°C]에서 피크를 나타내고 셀프힐링 된 시료는 384.7[°C]에서 열량피크의 최대치가 나타났

다. 열량의 경우 약 250[°C]에서 550[°C] 범위의 열량 변화를 보면 98,208[J/g]이었던 정상시료가 셀프힐링 되면 30,450[J/g]으로 약 3배가 감소한 것으로 보아 셀프힐링 시 발생한 열로 인해 폴리프로필렌 필름의 열량이 변화된 것으로 추정된다.

4. 결론

본 논문에서는 금속증착 커패시터 소재의 셀프힐링에 의한 소재의 열화 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 셀프힐링 된 커패시터 필름의 외형변화를 비교 하면 도전성분이 고르게 진공증착 되었던 부분이 비산되면서 셀프힐링이 된 것을 확인할 수 있었다. 금속 증착부분이 완전 비산된 부분은 탄소성분이 주를 이루고 있으며 일부 비산된 부분은 아연이 검출되었다.
2. 건전시료와 셀프힐링 된 커패시터의 필름을 적외선 스펙트럼 분석한 결과는 거의 일치하였으나 500[°C]에서 열처리한 시료와는 서로 달랐다.
3. 열량변화를 보면 98,208[J/g]이었던 건전시료가 셀프힐링 되면 30,450[J/g]으로 약 3배가 감소한 것으로 보아 셀프힐링 시 발생한 열로 인해 폴리프로필렌 필름의 열량이 변화하였다.

본 연구를 통해 금속증착 커패시터 소재의 기초 특성을 이해하여 향후 기초 설계자료 및 기술보완 자료로 이용하고, 커패시터 에너지 밀도 향상과 특성개선에 기여할 것으로 사료된다.

본 연구는 숭실대학교 교내연구비 지원으로 이루어졌음.

References

- [1] J.R. Laghari, et al., "Energy Storage Pulsed Power Capacitor Technology", Proceedings of the 34th International Power Sources Symposium, pp. 380-386, 1990.

- [2] C.W. Reed, "The Fundamentals of Aging in HV Polymer-film Capacitors", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 5, pp. 21-39, 1994.
- [3] Y. Makino, et al., "Measurements and Location Identification of Partial Discharge in Dry-type Metallized Polypropylene Film Capacitor", Japan-Korea Joint Symposium on ED&HVE, pp 265-268, 1999.
- [4] 곽희로 외, "커패시터 소체의 셀프힐링 발생위치에 관한 연구", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.113-115, 2001.
- [5] W.J. Sarjeant, et al., "Capacitors for High Power Electronics", Conference on Electrical Insulation and Phenomena, pp. 113-121, 1997.
- [6] HN. Nagamani, et al., "A Study of Electrical Endurance of MPPF Capacitors and Selection of End-point Criteria", IEEE Trans. on Electrical Insulation, Vol. 27 No. 6, pp. 110-118, 1992.
- [7] 狩野順史, "コンデンサ用フィルムの技術動向", OHM, pp. 36-40, 1998年 10月.
- [8] 곽희로 외, "Analysis of Self-Healing in MPPF Capacitor Elements", 2001 Japan-Korea Joint Symposium on ED&HVE, pp. 49-52, 2001.

◇저자소개◇

곽희로(郭熙魯)

1942년 3월 1일생, 1967년 서울대 전기공학과 졸(학사), 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸(석사). 1986년 중앙대 대학원 전기공학과 졸(박사). 1986년 MIT Visiting Scientist. 현재 숭실대 전기제어시스템공학부 교수 및 대학원장. 당학회 평의원.

송길목(宋信睦)

1967년 3월 31일생, 1994년 숭실대 전기공학과 졸(학사), 2003년 숭실대학교 대학원 전기공학과 수료(석사과정). 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 연구원.

김영찬(金永燦)

1957년 10월 21일생, 1985년 서울산업대 전기공학과 졸(학사), 1989년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸(석사), 1999년 숭실대 대학원 전기공학과 수료(박사과정). 현재 산업자원부 기술표준원 공업연구관.