

폴리프로필렌 필름 커패시터의 자기회복과 절연 특성

이성재, 이승, 김필수, 양창훈*, 박하용**, 민남기***
 대림대학, 뉴인텍(주), 삼척대학교**, 고려대학교***

Self Healing Characteristics of Polypropylene Films Capacitor

Seong Jae Lee, Seung Lee, Pil Su Kim, Chang Hoon Yang, Ha Young Park, Nam Ki Min
 Daelim College, Nuintek Ltd., Sam Chuk Univ., Korea Univ..

Abstract - 디지털 산업을 주도해 나아가고 있는 오늘날 아날로그 능동 소자의 대표라고 할 수 있는 커패시터는 모든 전기, 전자 부품 소재에서 매우 중요하게 적용되고 있다. 커패시터는 절연재료의 종류와 구조 그리고 사용 목적에 따라서 많은 종류를 가지고 있다. 최근 들어서는 용도에 적합하도록 선택사양을 가지고 있으며 소형화, 대용량화, 그리고 사용 온도범위를 넓게 하기 위한 온도 특성 연구가 활발하게 진행되고 있다. 동시에 고분자 필름 내부에서 결합이 존재하여 커패시터 자체가 파괴되기 전에 기본사양을 만족하면서 신속하게 회복할 수 있는 메카니즘이 발표되고 있다.

따라서 본 연구에서는 결합에 따른 유전 재료의 절연 파괴시 파괴 지점 주위에 급격하게 발생하는 열과 압력으로 패턴 또는 국부적인 자기 증발 현상을 발생시켜서 신속하게 전기적으로 절연시키는 방식에 대해서 언급하고자 한다.

1. 서 론

각종 커패시터에서는 용도에 적합하도록 소형화, 대용량화, 동작온도 등에 대한 기본 사양이 지속적으로 높아지고 있으며 이를 충족시키기 위해서는 다양한 고분자 계통의 유전재료 및 전극의 적용 그리고 부착 방법 등이 개선되고 있다. 여기서 중요한 내용은 유전재료 표면에 전극 부착 방법의 개선과 정전용량을 증대시키는 에너지 밀도의 개선에서 필요하다.

한편, 전극 부착 방법에서는 금속 증착법을 사용하는 데 이 과정에서 국부적인 재료의 결합과 전극의 불균형 등으로 과전압에 대한 단락 사고가 커패시터 전체에 미칠 수 있고 이는 기본 성능에 치명적인 영향을 초래할 수 있다. 이것은 유전 재료의 절연파괴 시 급격하게 발생하는 열과 압력으로 산화되면서 결합 주위부터 전체적으로 열 파급이 확산되기 때문이다.

커패시터에서 자기회복을 위한 고분자 박막의 실험과 내용은 증착 기술 및 절연파괴 실험을 거치면서 국부적인 요소에서 자기회복 특성을 설명하게 되었다. 결합이 존재하는 폴리에스터 필름에서 절연이 파괴된다면 필름의 양단에는 단락전류가 흐르며 동시에 국부적으로 큰 열과 압력이 발생하게 된다. 현재 사용되고 있는 대부분의 커패시터는 국부적인 사고가 발생할 경우, 자기회복을 할 수 있는 방식이 아니고 현저한 성능 저하를 보이고 있으므로 교체를 해야 하는 번거로움과 시스템 전체를 보면 신뢰성 측면에서 상당한 타격을 주고 있는 것이 사실이다.

본 논문에서는 폴리프로필렌 필름에 대해서 금속 증착을 하고 각각의 전극으로 사용되는 금속에서 절연파괴 강도와 현상을 이론적으로 설명한 후 절연 파괴 현상과 자기회복을 위해서 몇 가지 전극의 형성과정을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 폴리프로필렌 필름.

(Polypropylene : PP) 필름은 증착하는 종류에 따라서 다소 차이는 있으나 접착성을 향상시키며 절연파괴 특성을 제고시키기 위해서 코로나 열처리를 실시한다. 이러한 열처리 과정은 PP에서 발생하는 주름을 방지하고 기계적인 내부 응력을 최소화시키기 위한 방안이기도 하다. 이렇게 제작된 PP는 전기, 기계적 특성을 향상시켜서 콘덴싱을 하는 데 적절한 특성을 나타내고 있으며 롤링(rolling)을 하는 데 큰 장점을 가지고 있다. 다음 그림 1은 PP를 사용한 커패시터 소자의 기본 구조를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 금속 증착 패턴은 양쪽으로 치우치게 하여 전극으로 이용하고 있으므로 증착시 정속도와 정압 공정을 필요로 하고 있다.

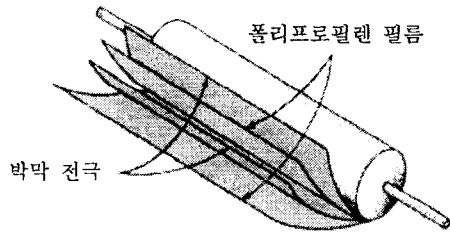


그림 1 PP 필름을 이용한 커패시터 소자의 구조
 Fig.1 Structure of PP film Capacitor

2.2 커패시터의 전기, 화학적 열화 메카니즘

커패시터에서 전기적인 열화 원인으로서는 코로나의 형태를 취하고 있으며 도전에 의한 전극의 경로 그리고 유전체 필름의 결합 등을 거쳐서 절연이 파괴되어 단락회로를 구성하게 된다. 커패시터의 전극 사이에 고체 유전체가 있는 경우는 그 사이에 기공이 존재 할 수 있으며 전압이 인가되면 기공에서는 더 큰 전계가 확산되어 부분 방전으로 발전하게 된다. 이러한 과정으로 절연체를 용융시킬 수 있을 정도의 매우 높은 열을 발생한다. 즉, 부분 방전이 진전되어 절연체를 탄화시키고 시간이 경과함에 따라서 기공 부분은 전계 방향으로 계속 성장하여 PP 절연체가 더욱 손상을 가지게 된다.

열적인 영향으로는 대단히 짧은(수 μ 정도) 필름을 가진 피크 전류가 높은 필름의 반복으로 인하여 자주 발생한다. 이러한 원인으로서는 넓리 알려지고 있는 물리적인 현상을 들 수 있다. 즉, 물리적인 현상은 모든 유전체가 에너지를 저장하고 있을 때와 방출할 때 에너지 손실을 발생하고 있는 데 이를 손실계수(Dissipation Factor)라고 하며 다음과 같이 설명하고 있다.

$$DF = \tan \delta = \omega C_s R_s \quad (1)$$

여기서 δ 는 손실각, C_s 는 직렬 커패시턴스, R_s 는

직렬 저항이다. 이들은 재료에 따라 다른 값을 가지며 주파수와 온도에 따라서 큰 값의 차이를 보이고 있다.

한편, 기계적 열화는 주기적인 충.방전으로 미세한 변위 운동을 유발할 수 있다. 전압이 인가되면 강한 정전력에 의한 절연체가 압박되어 방전시 스트레스를 받지 않는 곳으로 이동하여 와권 PP 필름의 중심부를 손상시킬 수 있다고 본다. 즉, 커패시터 내부에서 전기적인 충.방전이 발생하면 PP 유전체와 금속 전극을 포함하여 내부 구조물에 정전력이 작용하고 이것이 반복 운동을 하여 축적되면 기계적인 열화가 발생하게 될 수 있다.

2-3 유전체의 PP필름

일반적으로 커패시터 필름은 여러 가지 폴리머 계통의 유전체를 사용하고 있다. 즉, 폴리스틸렌, PET, PPS, PP 등이 사용되고 있는데 이들은 각각 전기적 화학적 성질의 장.단점을 가지고 있으므로 조합하여 사용하기도 하고 단독으로 적용하고 있다. 특히, PP는 밀도, 인장강도, 탄성을 등이 우수하며 전기적 특성에서도 유전율을 비롯하여 내전압 파괴 강도가 매우 우수한 것으로 알려져 있으며 본 논문에서 유전체로 사용하는 PP필름의 두께는 약 3.3 μ m의 두께를 이용하였다.

PP는 $CH_2 = CH - CH_3$ 로 표시되는 올레핀 계열 탄화수소의 프로필렌 중합체로써 열가소성을 가지고 있다. 나프타 크래킹에서 얻은 프로필렌 단량체를 정제하고 3염화 티탄과 알킬알루미늄을 촉매로 중합하여 PP를 생성한다. 일반적으로 필름은 텐더(tender)법이라고 하는 2축 연신 방법으로 제조한다.[1-3]

PP의 장점은 전기적으로 절연 특성이 매우 우수하다는 것과 PET(폴리에틸렌 테레프탈레이트) 다음으로 기계적인 강도가 우수한 것으로 많이 적용되고 있다.

2-4 PP필름의 금속증착

고분자 필름에 금속을 증착하는 것은 장식, 포장 등을 비롯하여 전자제품 등에 폭넓게 사용되고 있다. 고분자 필름과 금속은 기본적으로 화학적 성질이 다르므로 접착 방식으로 여러 가지가 등장하고 있는데 주로 사용되는 것이 고분자와 증착 금속과의 계면 접착력을 강하게 하기 위해서는 금속을 스퍼터링 방식으로 사용하는 것이 접착력을 제고시키는 데 유리하다.

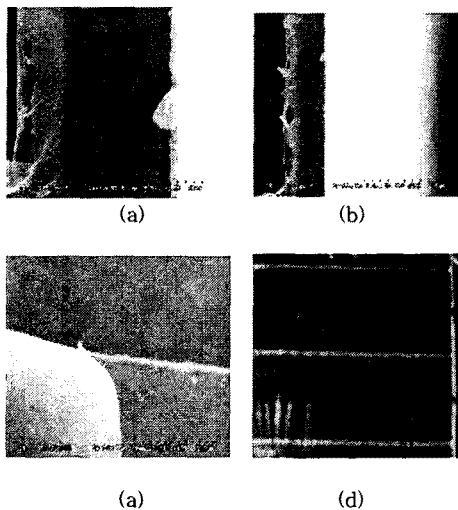


그림2 PP상에 금속 증착된 필름의 SEM 사진
Fig.2 SEM of Metalized PP Film

커패시터용 유전체에 사용된 PP 필름 위에 약 400Å의 아연을 증착하였다. 그림 2의 SEM 사진에서 (d)는 금속

증착 일부분을 나타낸 것으로 증착시 패턴 사이의 구조와 패턴의 포어를 (a),(b),(c)에 각각 나타내었다. 여기서 PP필름(흰색 부분)은 유전체에서 전자의 이동이 발생할 때 열화에 의해서 (d)의 패턴 손실로 자기회복 특성을 나눌 수 있도록 설계하는 것이 특징이다. 일반적으로 저압에서는 알루미늄을 사용하고 고압에서는 주로 아연을 사용하고 있으나 경우에 따라서는 합금을 사용하기도 한다. 특히 알루미늄이 자기회복 특성이 우수하고 비저항 값이 아연에 비해서 작다. 특히, 고분자 필름 상의 금속 증착은 진공 연속 증착기 내에서 증착하고자 하는 금속을 가열 증발시켜서 유전체 필름위에 응축시키는 것으로 고분자 필름과 금속의 증착력을 향상시키기 위해서 고분자 필름의 표면을 코로나 처리하기도 한다.[4]

2-5 금속 증착 필름의 절연파괴

PP필름 상에서 절연파괴 경로는 유전체의 표면을 따라서 진행되는 전자 cascade 또는 2차 전자 방출 avalanche라고 본다. 트리플 경선에서 전계가 방출된 전자의 일부는 유전체의 표면에 충돌하여 2차 전자를 가속적으로 방출한다. 이들 전자의 일부는 유전체 표면에 또 다시 충돌하면서 3차 전자를 방출한다. 이러한 진행과정으로 유전체 표면을 따라서 cascade가 발생하는 것이다.

커패시터는 제조과정에서 공정상 발생 가능한 결함을 제거하기 위해서 자기회복(self healing)을 일부러 발생시켜서 남아 있는 결함을 완전히 제거할 수 있다. 금속증착 고분자 필름 커패시터의 열화현상을 설명하면서 절연파괴의 메카니즘을 보면 다음과 같다.

전기적인 스트레스의 지속시간과 재료의 순도, 균질도 및 온도가 매우 양호한 조건이라면 절연파괴 전압은 상한까지 증가한다. 만약 이러한 조건에서 벗어나 고장에 이르는 시간은 약 10%에 도달할 수 있으므로 대부분의 절연 파괴전압은 전자적인 현상으로 기인하는 것이다.

다음 그림 3은 고전압 커패시터에서 유전체로 사용되고 있는 PP의 경우 인가된 전압 펄스 지속 시간에 따라서 전기적인 강도를 알아 본 것이다. 이 경우 절연강도는 상승시간이 더 짧은 펄스에 대해서는 지수함수 적으로 급증하는 것을 알 수 있다.

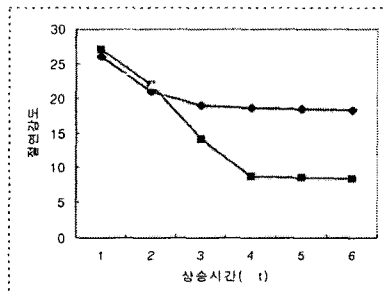


그림 3. 전압 상승시간에 대한 PP의 절연강도
Fig.3 Dielectric Strength of PP vs rising time

위에서 고찰된 절연파괴 메카니즘은 국부적인 열발생, 분해 그리고 용융에 의해서 고장을 일으킨다. 절연체의 열적 파괴는 주열원과 유전체 손실에 의해서 발생하는 경우가 대부분이고 이러한 열적인 불평형의 결과는 절연체의 온도를 상승시킨다. 열적 불평형의 조건은 다음과 같은 열 및 전류연속상태 공식으로 설명된다.

$$C_v \frac{dT}{dt} - \text{div}(k \nabla T) = \sigma E^2 \quad \text{---- (2)}$$

여기서 C_v 는 단위 체적당 비열이며 k 는 열전도도, 그리고 T 는 온도, σ 는 도전도, E 는 전계이다.

안정된 상태와 열적인 충격 절연파괴로 알고 있는 두 가지 경우를 고려하여 설명하고 있다.

정상적인 경우는 $\frac{dT}{dt}$ 항이 없으며, 임펄스의 경우는 공간적인 $\text{div}(k - T)$ 항이 존재하지 않는다. 따라서 열적 파괴의 이론적인 결과는 절연파괴 강도에서 온도의 증가는 일정 온도 경과 후 지수 함수적으로 감소한다는 것이다.(그림 4)

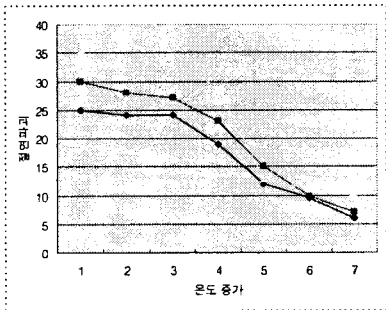


그림 4. 절연파괴 강도와 온도의 증가 관계
Fig. 4 Breakdown Voltage vs Temp.

또, 전기적인 스트레스는 유전체 내부의 평균 스트레스 보다 매우 높으며 결국 국부적인 절연파괴를 나타낸다. 이러한 방전이 장시간 지속되면 tracking, 전기화학 적 변화, 공간전하 형성, 유전체손 및 절연파괴로 발전하는 것이다. 모든 커패시터 사고의 90% 이상은 foil 또는 전극 edge에서 발생하는 부분 방전에 기인한다고 본다. 부분 방전은 갑자기 시작될 수 있으며 여러 가지 환경 변화에 따라서 영향을 받는다.

한편, 부분 방전은 foil edge에서 발생하는 전계를 낮출 수 있으므로 방전 개시 및 소멸 전압 스트레스를 증가시킬 수 있다고 본다. 그림 5는 절연 파괴 현상에서 장기적인 열화 고장의 원인이 되는 데 이를 극복하기 위해서 전극의 bridge화는 매우 유효하다고 할 수 있다.

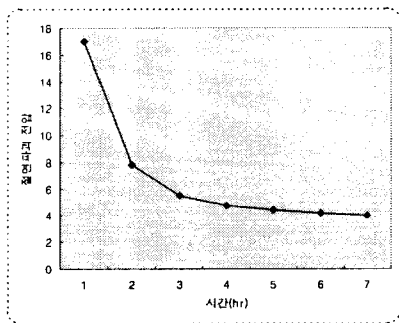


그림 5. 스트레스 시간에 따른 절연파괴 강도
Fig.5 Breakdown Strength vs Stress time

다음 그림 6은 3가지(70,80,90°C) 시험 온도에서 PP의 절연 파괴에 소요되는 시간에 대한 직류 전압의 관계를 나타낸 것으로 다음과 같은 관계를 성립시킨다.

$$L = kV^n \text{----- (3)}$$

여기서 L 은 고장이 날 때 까지 시간, k 와 n 은 정수이다. 그리고 수명의 감소는 직류 부분 방전 작용에 의한 것으로 판단된다. 이것은 대 출력 고전압 커패시터에 대한 연구에 큰 역할을 할 것으로 확신한다. 커패시터가 열화되는 과정에서 커패시터의 사고 요소가 항상 존재하고 있으며 과전압, 고조파와 같은 외적인 요소와 공정 상 발생하는 내적인 요소가 일반적인 예이다. 외적인 사고는 계통에서 발생되므로 적절한 대책으로 해결할 수 있지만 내적인 요소에서는 적절한 예방책에만 의존하는 것은 매우 위험한 일이다.

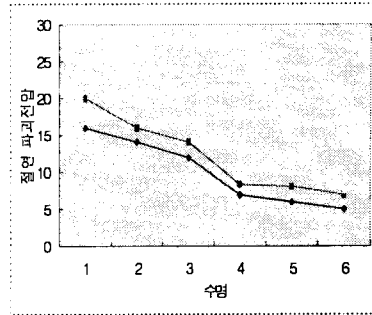


그림 dc 열화 조건에서 PP의 수명
Fig. Life time under dc bias

따라서 이러한 경우 대부분은 커패시터 자체의 자기회복에 대한 신뢰성 차원으로 깊게 연구해야만 한다.

한편, 커패시터용 PP 필름의 자기회복 현상을 분석하기 위해서 커패시터 내부에서 발생할 수 있는 사고를 각각의 부위별로 나누고 페턴별로 분류하는 것은 신뢰성 향상을 제고시키는 데 중요한 지표가 될 것이다. 이들은 크게 충격 전압에 의한 사고 내부 결함에 의한 자기회복 (self healing) 사고 및 고조파에 의한 사고로 나눌 수 있다. 지금까지 여러 가지 보고와 문헌에 의하면 금속 중착된 PP 필름의 자기회복에 의한 사고를 어떻게 제한하는 것이 경제적이고 발합직합가를 제시하고 있다.

3. 결 론

커패시터의 자기회복/절연강도 등은 대응량화, 장수명 등과 함께 신뢰성 회복을 위한 방법으로 많은 연구가 되고 있다. 본 논문에서는 전극을 부분 패터닝 하여 절연 강도 등 특성을 살펴보았으며 이러한 결과는 커패시터 특성에서 자기회복 작용에 도움이 될 수 있다고 본다. 특히, 동작 전압 이상의 스트레스 시간 증가에 따른 절연파괴 특성은 자기회복을 신속하게 구현하는 데 중요한 파라미터가 될 수 있다.

한편, 열화 조건에 따른 유전체의 국부적인 변화는 커패시터 사양 전체에 영향을 줄 수 있으므로 전극 증착 및 온도 상승에 따라서 열적 특성의 변화를 일으킬 수 있다. 커패시터의 사고 원인은 절연전압에 따른 전극에서 주로 발생되기 때문에 자기회복을 신속하게 증가시키는 데 필요한 전극의 구조 개선과 절연체의 물리적 현상에 대한 연구는 매우 중요하다고 본다.

[참 고 문 헌]

- [1] H.Y.Park and H.R.Kwak, "A study on the self healing characteristics of MPPF by Voids," Processing of KIEE, July 2000
- [2] C.W.Reed, "The Fundamentals of Aging in HV Polymer-Film Capacitor," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.1, No.5, October 1994, pp.21-39
- [3] Javaid R. Laghari and W. James Sarjeant, "Energy Storage pulsed Power Capacitor technology," Proceeding of the 34th. International Power Sources Symposium, 1990, pp.380-386
- [4] Javaid R. Laghari and W. James Sarjeant, "Energy Storage Pulsed Power Capacitor Technology," IEEE Transactions on power Electronics, Vol. 7, No.1, January 1992, pp.251-257
- [5] W.J. Sarjeant, F.W. MacDougall, "Capacitors for High Power Electronics," IEEE, 1997, pp.603-609
- [6] W.J. Sarjeant, "Capacitors," IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI 25, No.5, October 1990, pp.861-922
- [7] W.J. Sarjeant, F.W. MacDougall, D.W. Larson and I. Kohlberg "Energy Storage Capacitors: Aging, and Diagnostic Approaches for Life Validation," IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 33, No. 1, January 1997, pp.501-506
- [8] 정중욱, 권희로, 박하용, 박중신, 김영찬, "The self Healing Characteristics of MPPF for Energy Storage Capacitors," 대한전기학회 하계학술대회 논문집, 2000. 7, pp.2110-2112