

누설전류에 의하여 탄화된 유기절연재료의 특성에 대한 연구

(A Study on the Characteristics of Organic Insulating Materials Carbonized by a Leakage Current)

박상택* · 노영수**

(Sang-Taek Park · Young-Su Roh)

요 약

저전압용 절연체로 사용되는 유기절연재료는 누설전류에 의하여 탄화되는 경우 고유한 탄화특성을 나타낸다. 그러므로 유기절연재료의 탄화특성을 이용함으로써 유기절연재료의 표면을 흐르는 누설전류로 인한 전기화재를 규명하는 것이 가능하다. 이와 같은 탄화특성을 이해하기 위하여 본 논문에서는 대표적인 유기절연체로 알려진 페놀수지, PVC, 그리고 아크릴수지를 누설전류에 의하여 탄화시키는 실험을 수행하고 시료의 탄화패턴과 적외선 흡광 스펙트럼을 분석하였다. 탄화패턴 분석에 의하면 페놀수지는 열경화성 성질 때문에 소위 'spider-leg'의 탄화패턴이 형성된다. 페놀수지와 다르게 PVC와 아크릴 수지의 표면에서는 열가소성 성질 때문에 탄화원인을 규명할 수 있을 정도의 분명한 탄화패턴을 관찰하기 어렵다. 이 경우 적외선 흡광 스펙트럼의 분석을 통하여 누설전류로 인하여 탄화된 시료의 특성을 규명할 수 있다. 분석결과, 누설전류에 의해 탄화된 PVC의 경우에 파수 $3,400[\text{cm}^{-1}]$, $1,618[\text{cm}^{-1}]$ 에서 흡광피크가 검출되었으며 이것은 탄화원인을 규명할 수 있는 중요한 인자가 될 수 있다.

Abstract

Organic insulating materials which are utilized as insulating materials for the low voltage show unique carbonization characteristics when they are carbonized by a leakage current. Therefore the use of the carbonization characteristics makes it possible to examine the electrical fire which is caused by a leakage current flowing on the surface of the organic insulating material. In order to understand such carbonization characteristics, in this paper, experiments have been done to carbonize typical organic insulating materials such as phenol resin, PVC, and acrylic resin, and the carbonization patterns and the IR absorption spectrum of specimens have been analyzed. According to the analysis of the carbonization patterns, the phenol resin shows the so-called 'spider-leg' carbonization pattern due to a thermosetting property. In contrast to the phenol resin, the thermoplastic property makes it difficult to observe a clear carbonization pattern to verify carbonizing causes on the surfaces of PVC and acrylic resins. In this case, the IR absorption spectrum can be analyzed to examine the specimen carbonized by a leakage current. The analysis result shows that absorption peaks appear at the wave numbers of $3,400[\text{cm}^{-1}]$ and $1,618[\text{cm}^{-1}]$, which can be an important factor to verify the carbonizing causes.

Key Words : Organic Insulating Material, Electrical Fire, Leakage Current, Carbonization Characteristics

* 주저자 : 숭실대학교 전기공학과 석사과정
 ** 교신저자 : 숭실대학교 전기공학부 조교수
 Tel : 02-820-0640, Fax : 02-817-7961
 E-mail : pst2509@ssu.ac.kr

접수일자 : 2008년 12월 12일
 1차심사 : 2008년 12월 18일
 심사완료 : 2009년 1월 5일

1. 서 론

최근에 단락, 과부하 그리고 누전 및 트래킹과 같은 전기적인 원인으로 인하여 발생하는 전기화재는 지속적으로 발생하고 있으며 그 결과 엄청난 사회적 손실이 초래되고 있다[1-2]. 이와 같은 추세에 대응하기 위하여 화재를 미연에 방지할 수 있는 대책이 요구되고 있으며 그 일환으로 발생한 화재의 원인을 정확히 규명할 필요성이 제기되고 있다. 전기화재의 경우, 발화의 원인이 전류와 깊은 관계가 있으므로 발화재료는 일반적인 열에 의한 화재의 경우와 구분될 수 있는 특성을 나타낸다. 단락 혹은 과부하로 인하여 도전재료가 용단되는 경우에는 용단전류의 특성을 통하여 전기적인 원인을 규명하는 것이 가능하다[3]. 또한 폐놀수지와 같은 저전압용 절연재료에서 지속적으로 발생하는 누전 및 트래킹으로 인하여 재료의 표면이 탄화되어 도전로가 형성되는 경우에는 고유한 탄화패턴과 더불어 표면구조의 변화가 발생한다[4-5]. 그러나 트래킹 과정을 모의하고 이에 대한 화학적 분석이 이루어진 참고 문헌[4]와 [5]는 절연재료의 범위가 폐놀수지에 한정되어 있다.

본 논문에서는 저전압에서 누설전류로 인하여 유기절연재료의 표면에 형성된 탄화도전로를 실험적으로 모의하고 탄화된 재료의 특성에 대하여 논의한다. 연구 결과의 활용범위를 확장하기 위하여 저전압용 절연재료로서 광범위하게 사용되고 있는 폐놀수지, PVC, 그리고 아크릴 수지에 대하여 실험 및 분석을 수행하였다.

본 논문은 세 개의 장으로 구성되어 있다. 서론에서는 연구의 필요성과 주제를 언급하였으며 본문에서는 실험장치의 구성, 시료를 탄화시키는 조건, 탄화도전로의 형성과정 등에 대하여 논의한다. 또한 탄화된 시료의 탄화패턴과, 흡광 스펙트럼을 제시하며, 마지막으로 결론에서는 실험과 분석을 통하여 얻은 결과를 요약한다.

2. 본 론

2.1 실험장치의 구성

실험 장치는 유기절연재료의 표면에 누설전류를 인위적으로 발생시키는 부분과 시료의 표면에 흐르는 누설전류를 측정할 수 있는 변류기와 오실로스코프, 그리고 탄화도전로 형성과정을 촬영하기 위한 고속카메라 세트 등으로 구성되어 있다.

그림 1은 시료의 표면에 누설전류를 발생시키는 장치를 나타낸다. 시료에 누설전류를 발생시키는 전압은 AC 220[V]로 고정되어 있으며 연면방전이 시작할 때 주전원을 보호하기 위하여 1차 측과 2차 측이 분리된 10[KVA] 용량의 1 : 1 복권 변압기를 통하여 시료에 인가된다. 또한 100[Ω]-500[W]의 저항 4개를 설치하고 직렬 혹은 병렬로 변환이 가능한 제어판을 사용하여 누설전류의 크기를 0.55, 1.10, 2.20[A]로 조절이 가능하게 하였다.

그림 2에서 볼 수 있듯이 시료에 전압을 인가하고 누설전류를 발생시키기 위하여 사용되는 전극은 재질이 황동이고 형태에 따라 침전극과 면전극으로 구분된다. 침전극의 직경은 2[mm]이고 면전극의 크기는 150×100[mm]로 제작되었다. 전극 사이의 간격은 공통적으로 10[mm]로 유지되며 유기절연재료로서 실험에 사용되는 폐놀수지, PVC, 그리고 아크릴 수지 시료의 크기는 직경은 50[mm], 두께는 3[mm]이다.

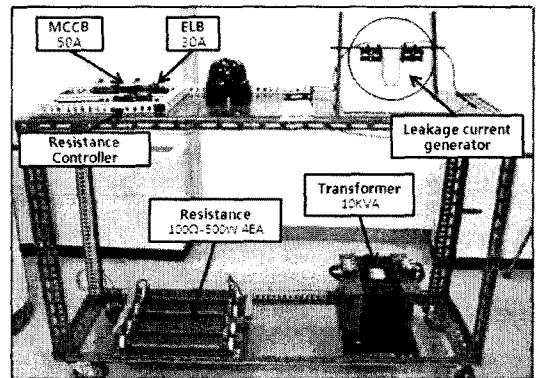
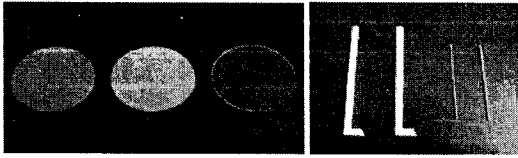


그림 1. 누설전류 발생 장치 사진
Fig. 1. The photograph of the apparatus to generate a leakage current



(a) 시료(폐놀수지, PVC, 아크릴수지) (b) 전극(황동)

그림 2. 시료 및 전극
Fig. 2. Specimen and electrodes

누설전류가 발생하여 탄화도전로가 발생하는 전후의 과정을 관찰하기 위하여 사용되는 고속카메라(MC-1311 ; 1280×1024, 500[fps], color) 세트는 최대 500[fps]로 60초 동안 촬영할 수 있는 장비이다. 그림 3에 고속카메라 세트를 나타낸다.

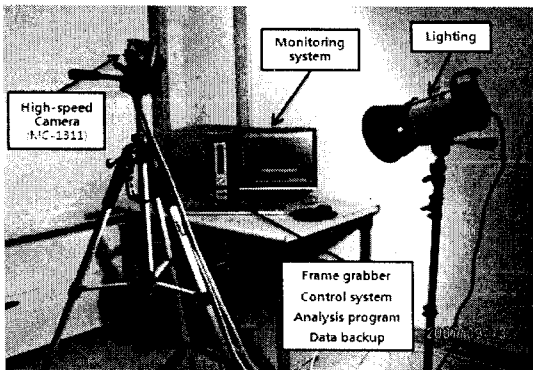


그림 3. 고속카메라 세트
Fig. 3. High speed camera set

표 1. 시료에 대한 탄화조건
Table 1. Carbonization conditions for specimen

실험조건	폐놀수지	PVC	아크릴수지
전극형태	침전극	면전극	침전극
표면열화정도	정상상태	#50, 100, 220	#50, 100, 220
첨가물	NaCl 용액	NaCl 용액	NaCl 용액 Carbon Paste

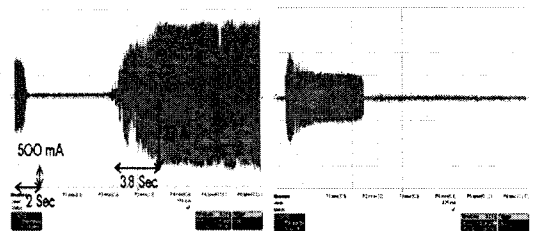
2.2 시료의 탄화조건

일반적으로 폐놀수지, PVC, 아크릴 수지 등의 유기절연재료는 발수성을 가지고 있으므로 표면에 수분이 스며들지 않는다. 그러나 표면이 열화되거나

표면에 분진과 함께 수분이 장시간동안 머물게 되면 표면의 절연내력은 저하될 수 있고 저전압에서 누설전류가 흐를 수 있다. 이 전류에 의하여 미소불꽃방전이 반복해서 발생하면 표면에 탄화도전로가 형성된다. 이와 같은 방법으로 탄화된 시료는 보통의 환경 조건에서는 얻기가 어렵기 때문에 실험의 목적을 위하여 전극 사이의 시료 표면에서 누설전류가 흐를 수 있는 상태를 인위적으로 만들 필요가 있다. 이것을 위하여 각 시료에 대한 전극형태, 표면열화정도, 첨가물 등에 대한 탄화조건을 변화시켰으며 그 내용은 표 1에 나열된 바와 같다. 여기서 표면열화정도는 표면을 연마하는데 사용되는 샌드페이퍼의 거칠기에 따라 정해지며 수치가 낮을수록 거칠기 정도는 높아진다.

2.3 탄화도전로의 형성과정

오실로스코프를 이용하여 누설전류의 파형을 측정하면 탄화도전로의 생성 여부를 확인할 수 있으며 그 전형적인 파형은 그림 4에 도시되어 있다. 여기서 (a)와 (b)는 탄화도전로가 생성되는 경우와 생성되지 않는 경우를 각각 나타낸다. 모든 경우에서 전압이 인가된 직후 시료 표면에 전류가 흐르는 것을 볼 수 있는데 이것은 도포된 NaCl 용액을 통해 흐르는 전류이다. 이후 용액이 증발하면 순간적으로 전류는 흐르지 않지만 줄(Joule) 열에 의한 시료 표면의 절연파괴 정도에 따라서 탄화도전로의 생성여부가 정해진다.



(a) 도전로가 형성된 경우 (b) 도전로가 형성되지 않은 경우

그림 4. 오실로스코프를 이용한 누설전류 측정
Fig. 4. Measurement of leakage currents using the oscilloscope

누설전류에 의하여 탄화된 유기절연재료의 특성에 대한 연구

그림 5는 고속카메라를 이용하여 촬영한 페놀수지 표면에서의 탄화도전로의 형성 과정을 나타낸다. 여기서 (a)는 전극 주변에서 미소방전이 발생하고 탄화가 시작되는 초기 상태, (b)는 국부적으로 발생하는 미소방전에 의하여 여러 가지 방향으로 진행되는 탄화도전로, (c)는 표면저항이 가장 작은 경로를 따라 형성되는 주 방전로와 그 주변의 분기방전로, (d)는 전극과 전극사이의 표면에서 형성된 탄화도전로를 따라 생성된 주 방전로를 나타낸다.

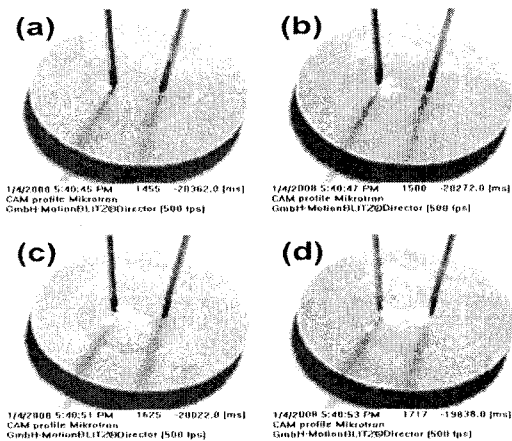


그림 5. 페놀수지 표면에서의 탄화도전로 형성과정
Fig. 5. The formation process of the carbonized conducting path on the surface of a phenol resin

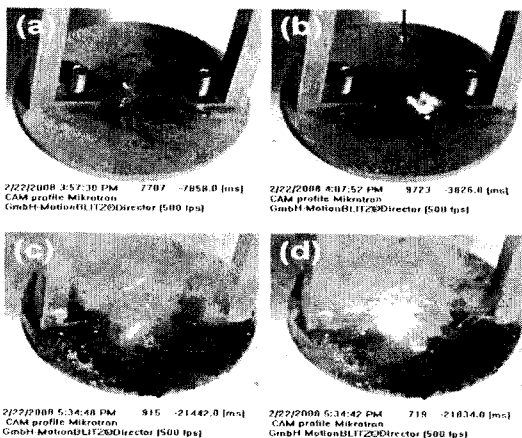


그림 6. PVC 표면에서의 탄화도전로 형성과정
Fig. 6. The formation process of the carbonized conducting path on the surface of a PVC

그림 6은 PVC의 탄화도전로 형성 과정을 나타내며 주요 현상을 시간이 지남에 따라 다음과 같이 요약할 수 있다. (a) 전극과 전극 사이에서 미소불꽃방전이 발생한다. (b) 염수를 지속적으로 적하하면 하나의 전극에서 탄화도전로가 형성되면서 미소불꽃방전이 커진다. (c) 페놀수지와는 달리 전극에서 지속적인 방전과 탄화도전로가 성장하는 특성은 없다. (d) 전극과 전극사이중심부분의 방전로에서 발생하는 미소불꽃방전에 의해 화염이 나타난 것을 보여준다.

아크릴수지의 경우 페놀수지나 PVC와 같은 조건에서는 탄화도전로가 형성되지 않았으므로 카본 페이스트(carbon paste)를 이용하여 표면처리한 후 누설전류를 흐르게 하였다. 그러나 이 전류에 의하여 시료 표면에서 페놀수지나 PVC의 경우와 같은 분명한 탄화도전로를 관찰할 수 없었으므로 이 경우 외부 열과 누설전류에 의한 탄화를 외형적으로 판별하기 어렵다.

2.4 탄화패턴 및 조직패턴

누설전류에 의하여 형성된 탄화도전로의 패턴은 매우 다양하게 나타난다.

그림 7은 페놀수지에 형성된 탄화패턴의 전형적인 모양을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 탄화패턴은 육안으로 규명할 수 있을 정도로 뚜렷하게 나타나는데 이것은 페놀수지가 열경화성을 갖기 때문이다. 누설전류의 크기가 변화하면 탄화도전로의 성장 패턴도 다르게 나타난다. 즉, 누설전류의 크기가 클수록 소위 'spider-legs'[6]의 생성이 활발하며 누설전류의 크기에 따라 방전로 굵기가 결정된다.

그림 8은 누설전류에 의하여 PVC 표면에 형성된 탄화패턴의 전형적인 모양이다. 페놀수지에서 볼 수 있는 수지상의 탄화패턴이 국부적으로 관찰되지만 불연속적인 탄화도전로와 누설전류로 인한 것으로 보기 어려운 탄화 흔적이 혼재되어 있다. 이것은 PVC의 열가소성과 관련되어 있다. 즉, 누설전류에 의하여 발생하는 열에 의하여 PVC 시료에는 소성변형이 일어나 누설전류에 의한 탄화를 규명할 수 있는 분명한 탄화패턴을 정의하기가 어렵다. 열가소성

이 더 강한 아크릴수지의 경우 탄화도전로의 패턴은 더욱 더 불분명하다.

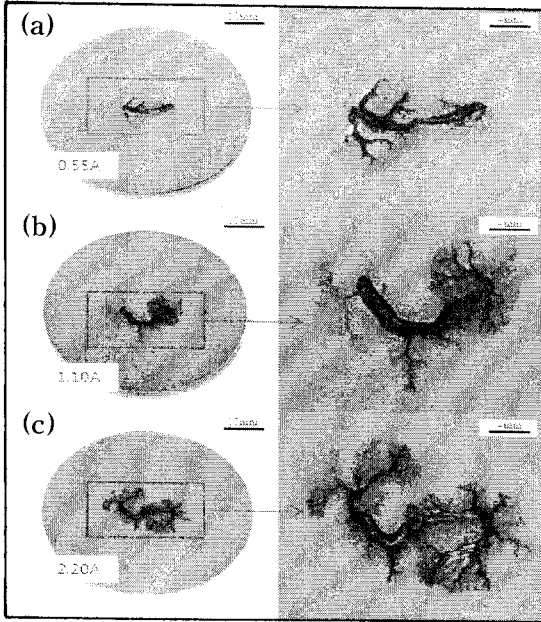


그림 7. 페놀수지의 탄화패턴
(0.55(A), 1.10(A), 2.20(A))
Fig. 7. Carbonization pattern of phenolic resin
(0.55(A), 1.10(A), 2.20(A))

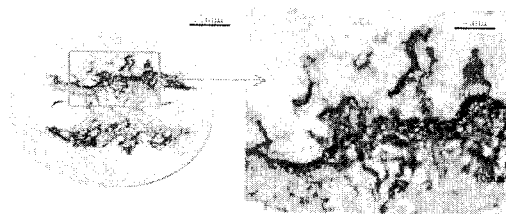


그림 8. PVC의 전형적인 탄화 패턴
Fig. 8. Typical carbonization pattern of PVC

열가소성수지의 탄화패턴을 규명하기 어려운 이유는 광학현미경을 이용하여 탄화된 PVC의 변이된 조직을 관찰하면 알 수 있다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 누설전류에 의한 탄화과정에서 PVC의 표면조직은 다양한 패턴을 나타낸다. 여기서 (a)는 PVC의 표면이 열의 영향으로 인해 생긴 탄화조직의 패턴이다. 경계면을 중심으로 탄화된 부분에서는 기포가 형성되어 있고, 황변현상과 구멍이 형성된 것을 볼 수 있

다. 이것은 탄화도전로 주변의 표면이 열에 의해 연화되는 것을 나타낸다. (b)에서는 경계면을 중심으로 PVC 표면의 탈색된 부분을 확인할 수 있으며 이는 열가소성수지가 열경화되는 과정을 나타내는 것이다. (c)는 경계면을 중심으로 탄화부분과 정상부분이 급격하게 나누어지는 부분으로 수지상이 형성되지 않은 상태에서 PVC가 줄열에 의해 탄화되면서 탄화영역을 확대하는 과정에서 형성된 것으로 추정된다. (d)는 경계면에서 수지상 조직이 나타나는 것으로 수지상 조직 주변에는 황변현상이 나타나 있으며, 수지상의 성장은 전극을 중심으로 뻗어 있는 것을 볼 수 있지만 열경화성수지의 연화로 인해 일정한 패턴은 보이지 않았다. (e)는 경계면을 중심으로 탄화된 부분과 그렇지 않은 부분으로 나누어지나 표면은 열에 의해 전체적으로 기포가 형성되어 있거나 황변현상이 전반적으로 진행되는 과정을 보여준다. 이는 탄화가 진행되면서 주변에 열적인 영향을 주는 것으로 판단된다. (f)는 수지상조직 형태의 탄화된 부분이 일정패턴을 가지고 진행되는 것을 보여준다. 결과적으로 표면의 변형이 거의 이루어지지 않는 상태에서 탄화가 진행되는 페놀수지와 같은 열경화성

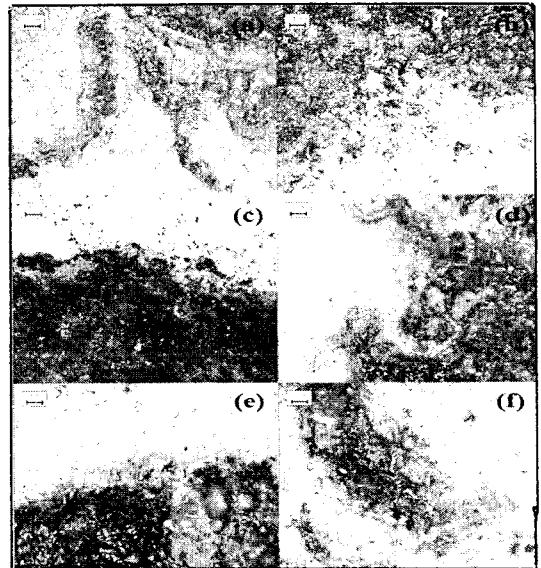


그림 9. 줄열에 의한 PVC의 탄화조직
Fig. 9. The carbonization structure of PVC due to Joule heat

수지에 비해 열가소성수지는 탄화도전로가 형성되는 시점에 기포발생 또는 기타요인에 의해 표면이 변형됨으로써 패턴이 다양해지는 것으로 판단된다.

2.5 적외선 흡광 스펙트럼 분석

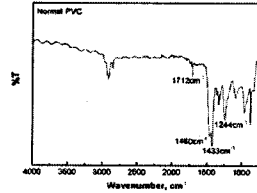
일정한 파장의 적외선을 시료에 조사하여 반사 또는 투과할 때 검출되는 적외선 스펙트럼에 대한 정보를 이용하면 표면의 화학적 구조를 알 수 있다[7]. 따라서 표면의 화학적 구조는 누설전류로 인한 탄화도전로를 규명하는데 매우 중요하다. 본 논문에서는 적외선 분광기(FT-IR spectrometer, PerkinElmer, UK)를 이용하여 탄화되지 않은 정상시료, 외부 열에 의하여 탄화된 시료, 그리고 누설전류에 의하여 탄화된 시료에 대하여 적외선 흡광 스펙트럼을 조사하였다. 페놀수지에 대한 흡광 스펙트럼은 참고문헌[4]에 이미 기술되어 있으므로 여기에서는 PVC에 대한 스펙트럼 특성을 논의한다.

그림 10은 PVC 시료의 표면에 적외선을 조사하여 얻은 흡광피크에 대한 스펙트럼을 나타낸다. 그림 10 (a)의 정상상태 표면의 주요 흡광스펙트럼을 살펴보면 파수 1,712[cm⁻¹], 1,460[cm⁻¹], 1,433[cm⁻¹], 1,244[cm⁻¹] 등에서 흡광피크의 출현을 볼 수 있다.

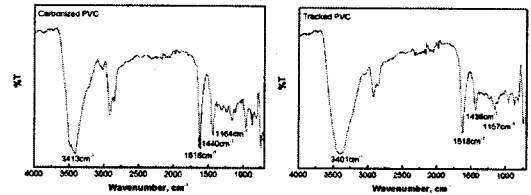
외부 열에 노출되어 탄화된 PVC의 경우(그림 10 (b)) 정상상태와 다르게 약 3,400[cm⁻¹]의 파수에서 흡광피크를 관찰할 수 있는데 이것은 외부의 수분과 결합하여 나타나는 탄소와 수소 또는 산소와 수소의 단일결합으로 인한 결과이다. 여기서 특별히 주목할 점은 1,616[cm⁻¹]에서 이중 흡광피크가 검출된다는 것이다. 이것은 시료가 외부의 산소와 결합하여 생긴 탄소와 산소의 이중재결합과 관련이 있다.

누설전류에 의해 탄화된 경우(그림 10 (c)) 외부 열에 의한 탄화와 유사하게 외부의 산소 또는 수분과 결합하여 나타나는 약 3,400[cm⁻¹]의 적외선 흡광피크가 검출된다. 그러나 정상상태와 다르게 약 1,720[cm⁻¹]범위의 적외선 흡광피크는 관찰되지 않는다. 또한 1,618[cm⁻¹]의 흡광피크가 검출되지만 외부 열에 의한 탄화와 다르게 이중 흡광피크는 출현하지 않는다. 이것은 외부 열과 누설전류로 인한 탄화 상태를 구분할 수 있는 매우 중요한 특징이다. 이

러한 차이점은 누설전류에 의해 탄화될 경우 시료는 상대적으로 매우 짧은 시간 동안에만 주변 산소와 결합한다는 사실로 설명될 수 있다.



(a) 정상상태



(b) 외부 열에 의한 탄화 (c) 누설전류에 의한 탄화

그림 10. PVC 시료의 적외선 흡광스펙트럼
Fig. 10. The absorption spectrum of the PVC specimen

3. 결 론

누설전류로 인하여 유기절연재료의 표면에 형성되는 탄화도전로는 외부 열에 의한 탄화와 구별될 수 있는 탄화패턴, 표면구조변이, 그리고 적외선 흡광스펙트럼을 나타낸다.

탄화패턴은 시료의 열 특성, 표면상태, 누설전류의 크기 등에 따라 정해진다. 열경화성수지인 페놀수지의 경우 누설전류의 열에 의하여 표면은 경화되므로 수지상과 소위 'spider-leg' 형태의 탄화패턴이 육안으로 규명할 수 있을 정도로 뚜렷하게 형성된다. 그러므로 이와 같은 탄화패턴은 열경화성수지의 탄화원인을 규명할 수 있는 충분조건이 될 수 있다. 한편, 열가소성 수지인 PVC와 아크릴 수지의 경우 열에 대한 소성변형 성질 때문에 탄화원인을 규명할 수 있을 정도의 분명한 탄화패턴은 형성되지 않는다. 광학현미경을 이용하여 탄화된 PVC 시료의 표면을 자세히 관찰하면 누설전류에 의하여 정상시료의 조직과 분명히 구별될 수 있는 표면조직변이가 발생한

것을 알 수 있다.

탄화페틴이 분명하게 나타나지 않는 시료(특히 열가소성수지)의 경우, 탄화원인에 따라 시료 표면의 화학적 구조는 다르다. 적외선 흡광스펙트럼을 이용하여 시료의 화학적 구조는 분석되며 그 주요 내용은 다음과 같다. 외부 열에 의해 탄화된 PVC의 경우 정상상태와 다르게 약 $3,400[\text{cm}^{-1}]$ 와 $1,616[\text{cm}^{-1}]$ 의 파수에서 흡광피크가 출현한다. 외부 열에 의해 탄화된 PVC의 흡광스펙트럼의 대표적인 특징은 파수 $1,616[\text{cm}^{-1}]$ 에서 이중 흡광피크가 나타난다는 점이다. 누설전류에 의해 탄화된 PVC의 경우도 외부 열의 경우와 유사하게 약 $3,400[\text{cm}^{-1}]$, $1,618[\text{cm}^{-1}]$ 에서 흡광피크가 검출된다. 그러나 외부 열에 의한 탄화와 다르게 파수 $1,618[\text{cm}^{-1}]$ 에서 이중 흡광피크는 나타나지 않으며 이 차이점은 두 탄화원은 구별할 수 있는 필요조건이 될 수 있다.

본 연구는 지식경제부 지원에 의하여 주관기관 기초전력연구원 과제번호 R-2007-2-048 연구비 및 송실대학교 교내연구비 지원으로 진행되었습니다.

References

- [1] 소방방재청, "2006년도 화재통계연감", 2007.
- [2] 한국전기안전공사, "전기제해통계분석", 한국전기안전공사 보고서, 2007.
- [3] 송길목, 노영수, "전선의 용단전류 특성에 근거한 단락과 과부하 판별에 관한 연구", Journal of KIEE, Vol.21, No.10, pp.176~180, 2007.
- [4] 송길목, 노영수, 곽희로, "열처리된 페놀수지 표면에서의 방전 특성과 구조분석", Journal of KIEE, Vol.20, No.8, pp.71~79, 2006.
- [5] 송길목, 노영수, 곽희로, "트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화특성", KIEE Trans. Vol.53C, No.1, pp.1~7, 2004.
- [6] P. Uhlig, J.C. Maan and P. Wyder, Phys. Rev. Lett. 63, 1968(1989).
- [7] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, Dong-Woo Kim, "The Analysis of Dendrite Structure of Electric Wire Melted by Fusing Current", 2003J-K Joint Symp. on ED&HVE, pp.148-154, 2003.

◆ 저자소개 ◆

박상택 (朴商澤)

1982년 10월 15일생. 2008년 송실대학교 전기공학부 졸업. 현재 송실대학교 대학원 전기공학과 재학(석사과정)

노영수 (盧永秀)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1995년 한국전기연구원 연구원. 2001년 미국 캘리포니아주립대(Davis) 응용과학과 졸업(박사). 현재 송실대학교 전기공학부 교수.