

열처리된 페놀수지 표면에서의 방전 특성과 구조분석

(Surface Discharge Characteristics of Phenolic Resin Treated by Heat and Its Structure Analysis)

송길목* · 노영수** · 곽희로**

(Kil-Mok Shong · Young-Su Roh · Hee-Ro Kwak)

요 약

페놀수지 표면에서의 트래킹 방전에 대한 화재원인을 규명하기 위하여 검증실험, FT-IR, DTA, 사진촬영 등의 다양한 방법으로 분석하였다. 페놀수지는 유기질 절연재료 중 저전압기기의 외함재료로 가장 많이 이용된다. 본 실험에서는 외부열에 의해 탄화질로 변화되는 것과 전기적 원인에 의해 흑연질이 되는 것에 대해 재료분석을 통한 방법으로 규명하였다.

FT-IR을 이용하여 표면방전에 의해 탄화된 시료는 150[°C]에서 열처리된 시료로부터 약 1730[cm⁻¹] 부분과 1680[cm⁻¹]부근의 적외선흡광피크를 확인하였다. DTA를 이용하여 페놀수지는 약 450[°C] 부근에서 발열피크가 나타났으며, 방전에 의해 탄화된 재료는 약 610[°C] 부근에서 발열피크가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이로써 전기화재원인을 규명하는 것이 가능하게 되었다. 이 결과들로부터, 전기화재의 예방과 국민의 생명과 재산을 지키는 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

Abstract

For clearing the cause of firing due to the tracking on the surface of phenolic resin, this paper describes the analysis through a couple of methods ; FT-IR; DTA; photograph analysis, etc. Phenolic resin has been widely employed as a case of low voltage appliances. In the experiment, it was confirmed that its surface was carbonized and graphitized by the external fire. In the FT-IR test, a graphite specimen thermally treated at 150 [°C] showed the 2 different IR absorption peaks at 1,730[cm⁻¹] and 1,680[cm⁻¹]. In normal phenolic resin, the exothermic peak appeared at 450[°C], while in graphite specimen, it appeared at 610[°C] in DTA test. From the results, the electrical fire causes could be cleared and it is expected to protect the human life and property from the electrical fire by using the important data.

Key Words : Tracking, Structure analysis, FT-IR, SEM, Thermal analysis, Surface, Discharge, IR spectrum, Tracking, Heating treated temperature

* 주저자 : 전기안전연구원 재해예방연구그룹

** 교신저자 : 송실대학교 전기제어시스템 공학과

Tel : 031-580-3033, Fax : 031-580-3045

E-mail : natasder@kesco.or.kr

접수일자 : 2006년 7월 26일

1차심사 : 2006년 7월 28일

심사완료 : 2006년 8월 4일

1. 개요

전기로 인한 피해는 산업이 고도화되고 다양화 될 수록 더욱 커지고 복잡화되어 가고 있다. 전기사고의 대부분은 인간에게 직접적인 피해를 주는 감전과 설비사고로 나누어진다. 설비사고는 크게 사고위치에 따라 옥외용과 옥내용 설비의 사고로 분류된다. 일반적으로, 옥외용 설비의 사고는 정전, 설비의 고장 등으로 파급이 되는 것에 비해 옥내용 설비의 사고는 화재로 이어져 재산상의 손실뿐만 아니라 많은 인명피해를 가져다준다[1-3].

전기화재의 원인분석은 전기 시스템 분석에 의한 것과 전기재료 분석에 의해 크게 두 가지로 구분된다. 시스템 분석은 사고 발생된 전기설비에 대해 부하용량을 산출한다든지 위험부위 노출에 따른 안전성 평가 등 주변요소에 의한 판정된다. 그러나 추정이나 주변 목격자의 진술을 토대로 한 자료는 법적 공신력이나 과학적인 입증자료로서 불충분하다. 따라서 전기 시스템 분석과 더불어 과학적으로 뒷받침할 수 있는 재료분석이 이루어지고 있다. 단락에 의한 전기사고의 경우, 구리(Cu)나 알루미늄(Al)의 단면조직을 분석하여 순간적 높은 열에 의해 생성된 성장조직 등으로 사고원인을 분석하고 있으며, 선진 외국의 경우에도 이를 이용한 분석방법이 활성화되어 있다[4-5]. 절연재료의 경우 열에 의해 쉽게 소손되므로 분석에 어려움이 많다. 그러나 열패턴에 대한 경향과 탄화조직의 생성 등의 분석을 통해 화재의 원인을 분석하고 이에 대한 메커니즘 해석이 일부 가능하다[6-8].

본 연구에서는 열에 의한 소실이나 외형적으로 판단이 어려운 경우, 탄화물의 특성 중 외부의 열에 의해 탄화되었을 때와 누설전류에 의한 연면방전에 기인하여 탄화되었을 때를 비교 분석하였다. 연구결과는 향후 향상된 재료의 개발과 전기사고의 예방대책을 제시하여 재해를 최소화하기 위한 중요자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 도전성을 갖는 탄소의 생성

2.1 탄소의 특성

탄소는 지구상에 존재하는 유기물에 기본적으로 포함된 원소이다. 따라서 유기질 재료는 열에 의해 탄화되면 탄소가 남게 된다. 탄소의 동소체로서는 비결정성 탄소, 흑연, 다이아몬드 이외에도 사슬(normal chain)모양의 탄소분자로 이루어진 것도 있다. 물리적, 화학적 성질은 매우 다르나, 그 차이는 구조적 차이에 기인하는 경우가 많다[9-11]. 비중은 비결정성 탄소는 1.8~2.1, 흑연은 1.9~2.3이고 다이아몬드는 3.15~3.53이다. 따라서 비결정성 탄소와 흑연은 다이아몬드에 비해 상대적으로 비중이 낮은 것을 알 수 있다. 또한 탄소의 동소체로서 유기질 절연재료를 구성하는 탄소질로서 결정구조는 비결정질의 형태의 절연성을 가지고 있다. 흑연질은 결정질로 절연성이 낮아 전기가 흐르는 도전성을 가지고 있다.

다이아몬드는 흑연질과 같은 결정질이나 절연성은 매우 높다. 전기적 원인에 의해 유기질 절연재료가 탄화되면 아크의 고온이 극히 짧은 시간 동안 절연재료의 표면에 가해져 결정질 형태로서 도전성을 가진 흑연화 현상이 나타나게 된다[12-13].

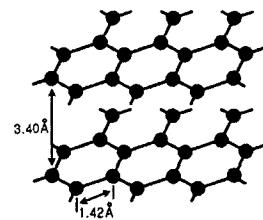


그림 1. 탄소의 결정구조
Fig. 1. Crystalline structures of carbon(graphite)

따라서 양질의 절연재료를 선택하기 위하여 유전율 및 유전정접 등 유전특성이 고려되어야 하고 이 밖에도 내열성, 내수성, 내후성 등 열과 수분, 자외선이나 산화가 촉진되지 않도록 구성된 재료의 선택이 중요하다. 또한 기계적 특성이 우수하여 진동이나 충격에 강하고 화학적으로 안정되어야 한다. 현재, 개발 중인 절연재료는 전기적, 열적으로 우수한 성질과 더불어 친환경 등을 고려한 재료의 개발이 이

투어지고 있다[14-16].

그러나 이러한 재료의 개발에도 불구하고 줄열(Joule's heat)에 의해 온도가 상승하고 온도상승에 따라 도전율이 커져 전자의 흐름이 가속화되어 파괴되는 열적 파괴와 전자에 의해 가속된 전자가 결정 격자와 충돌할 때 자유전자와 정공을 만들며 전자가 다시 반복적인 현상에 의해 전자사태가 발생하는 전자적 파괴로 인해 사고로 이어진다[17]. 시간에 따른 절연파괴강도의 연관성을 보면 짧은 시간내에 절연 파괴가 되는 경우는 전기적으로 강한 충격을 받아 절연이 파괴되나, 오랜 시간 방치된 재료는 열적으로 혹은 침식과 전기화학적 요인에 의해 서서히 파괴되기 진행된다. 파괴강도는 전기적 요인보다 훨씬 낮은 강도를 가진다[18].

도전성을 가진 탄소는 산업현장에서 주로 이용되는 흑연전극이 대표적이다. 이는 탄소배열을 일정하게 조작하여 도전성을 확보함으로써 다양한 분야에 이용되고 있다. 주재료로서는 석탄의 건류를 통해 얻어지는 코크스(coke)가 있다. 제조과정을 보면, 점결성 석탄을 용기에 넣고 밀폐해서 1,000[°C] 내외로 가열한다. 수분이나 휘발분이 가스가 되어 방출되어 대부분의 탄소와 회분으로 이루어진다. 이렇게 조작된 탄소는 약 10[μm]의 굵기로 분쇄, 성형, 약 1000[°C]의 열을 가하여 유기성분을 제거한 탄소화가 진행된다.

피치(pitch)함침, 재소성과정과 전류를 흘려보내 약 3,000[°C]의 온도에서 처리하면 흑연화되어 결정 구조가 발달한 등방성 흑연이 된다. 이러한 공정은 일반적인 자연현상에서 발생되기보다 인위적인 처리과정을 통해 얻어지는 경우가 많았다.

전기사고 중 절연물의 표면에 발생하는 누설전류나 방전전류에 의해 절연물 표면에 탄화도전로가 발생된다. 표면에 분진, 먼지 등과 함께 수분이 맺히게 되면 발수성(hydrophobicity)의 절연재료가 점차 친수성(hydrophilicity)으로 변하면서 누설전류가 흐르게 된다. 이때 전극간 혹은 전극과 접지사이의 수분이 누설전류에 의해 발열되어 증발하고 미소불꽃방전이 반복해서 발생하면서 열분해(thermal decomposition)가 시작된다[11]. 탄화물은 흑연화되어 도전성을 가진다. 이러한 사고의 메커니즘은 매우 중요하며 사고원인을 분석하거나 예방을 위한 기술개

발에 응용될 수 있다.

본 실험에 이용된 재료는 저전압용 외함재료로 널리 이용되는 페놀수지이다. 발화온도는 약 532[°C]로 나타나 있다. 절연재료의 경우에는 대개 약 250[°C]에서 600[°C] 사이에서 발화되는 것을 알 수 있다. 따라서 열처리 과정과 트래킹 실험을 체계적으로 수행하였다. 탄화물의 균열 및 변형된 상태는 광학현미경에 의해 촬영되었다. 탄화표면의 화학적 표면구조 분석은 적외선분광기를 이용하였다. 열분석기를 이용하여 흡열 및 발열반응피크를 비교하였다.

2.2 절연재료의 방전형태

저전압에서 많이 발생하는 트래킹은 전극과 전극 사이의 표면누설전류에 의해 절연물에 탄화도전로가 형성되어 절연이 파괴된다.

방전에 의한 열화는 표면에 누설전류가 흐르는 표면방전(surface discharge), 전극과 전극사이에서 고체 유전체에 절연이 파괴되는 트리잉(treeing), 전극간 기체사이에서 많이 발생하는 아크(arc) 등이 대표적인 방전의 예이다.

그림 2는 전극의 위치에 따른 방전형태를 보여준다. 표면에 누설전류가 흘러 방전되는 경우 전극과 전극 사이에서 방전이 발생하는 형태와 전극과 접지극 사이에서 방전이 발생하는 형태로 구분될 수 있다.

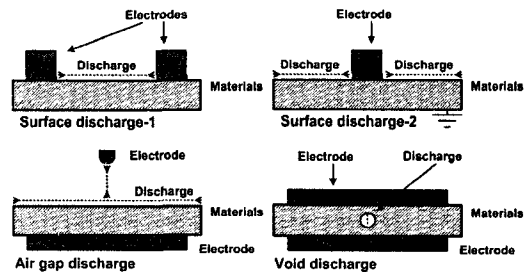


그림 2. 방전의 형태
Fig. 2. Type of discharges

3. 실험방법

절연재료의 열화원인 중 표면누설전류가 흘러 탄화도전로가 형성되어 화재로 이르는 트래킹이 있다.

열처리된 페놀수지 표면에서의 방전 특성과 구조분석

본 실험에서는 절연파괴와 외부화염에서 얻은 탄화물을 비교·분석하여 화재의 원인을 규명하기 위하여 크게 트래킹을 유발시키기 위한 시험과 외부화염에 의한 탄화물 생성을 일정한 조건하에서 실험하도록 구성하였다. 따라서 전기사고에 있어서 원인 판정이 모호한 옥내설비에 사용되는 절연재료 중 페놀수지를 선택하였다.

페놀수지는 수산화기를 가지고 있으므로 유전정점은 크나 절연저항은 크지 않다. 절연재료로서 양호하지는 않으나 기계적, 화학적으로 안정하고 내열, 내용제, 내유성을 가지며 경제적이다. 표면이 누설전류에 의한 방전으로 온도가 올라가면 탄화되어 도전성을 나타내므로 내아크성, 내트래킹성은 약하다[19-20]. 따라서 페놀수지를 이용하여 IEC Publ. 60112에 의한 실험구성과 현장에 근접하도록 모델링하여 열 열화에 따른 탄화 특성을 분석하도록 하였다.

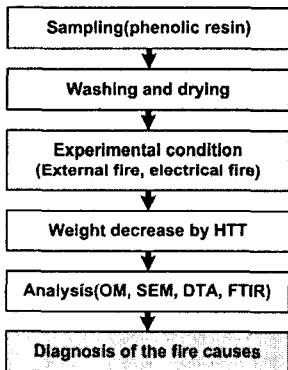


그림 3. 실험 및 분석과정
Fig. 3. Process of the test and analysis

그림 3은 실험 및 분석과정을 나타낸 것으로 실험에 적합하도록 제작된 시료는 세척과 건조과정을 거쳐 이물질을 최소화하였다. 실험조건으로 외부화염에 의한 조건은 전기로(Electric muffle furnace, SSH-1500, Shinsung Heat Co., Korea)를 이용하여 각 열처리 온도(HTT; heating treatment temperature)를 설정하였다. 열처리된 시료와 열처리되지 않은 시료는 IEC Publ. 60112법을 응용한 트래킹 열화 시험법을 적용하였다. 이때 방전전류의 특성은 기록계를 이용하여 시차적으로 측정하고, 열처리된 시료는 실체현미경(stereoscope, Carlziess, Denmark),

금속현미경(Metallurgical Microscope, Epiphot, NIKON, Japan), 주사전자현미경(SEM, JSM6400, JP)에 의해 표면을 각각 확대하여 분석하였다. 흡열 및 발열반응 특성을 확인하기 위해 열분석기(TA, STA2960, USA)를 이용하였으며, 화학적 표면구조의 변화는 적외선분광기(FT-IR, Spectrum GX, USA) 등에 의해 비교·분석되었다.

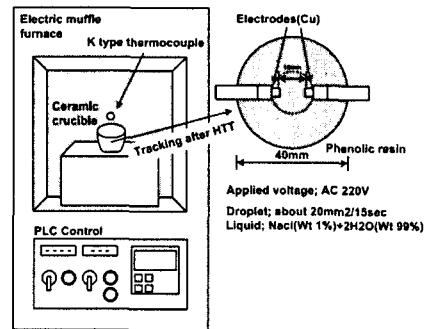


그림 4. IEC Publ. 112법을 이용한 개략도
Fig. 4. Schematic diagram by using a method of IEC Publ. 60112

그림 4에서는 열처리에 필요한 전기로(Electric muffle furnace, SSH-1500, Shinsung heat Co., Korea) 및 제어 장치를 구성한 것이다. 실험에 이용된 시료는 페놀수지의 지름 40[mm], 두께 2[mm]의 원형으로 일정하게 절단한 후 실험하였다.

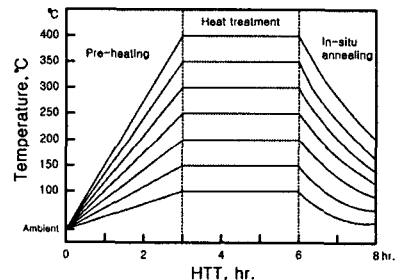


그림 5. 열처리온도 설정
Fig. 5. HTT setting up

페놀수지는 공기 중에서 외부의 영향을 최소화하여 가열하기 위해 세라믹 도가니(ceramic crucible)로 2중 차폐하였다. 열처리온도는 100[°C]에서 400[°C]까지 50[°C]씩 변화시켜 각 설정온도에서 3시간

동안 분당 10[°C]씩 램핑시간(ramping time)으로 상승하였다. 이후 3시간동안 유지한 후(isothermal time) 원상태로 풀림(annealing)하는 과정을 프로그램화하여 제어하였다. 따라서 시료는 정상품과 함께 총 8종의 조건으로 구분되었다.

4. 열처리에 의한 특성 변화

4.1 실체현미경에 의한 확대

그림 6은 실체현미경을 이용하여 표면의 변화를 촬영한 것이다. 150[°C]에서 열처리된 시료는 약간의 굴곡이 나타나고 표면이 불규칙한 면을 확인할 수 있다. 이는 마이크로브라운 운동을 시작하는 초기단계인 것으로 판단된다. 350[°C]에서 열처리된 시료는 표면에 균열(crack)이 생기고 탄화되어 사실상 열적인 손실이 크게 증가하였음을 확인할 수 있다.

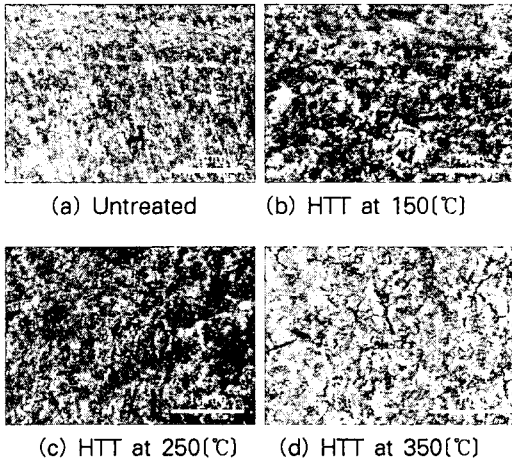


그림 6. 열처리온도에 의한 표면변화
Fig. 6. Surface change by HTT

4.2 표면분석

그림 7은 금속현미경으로 시료 표면의 이미지를 촬영한 것으로 각 온도에 따른 표면변화를 확대하여 보면, 열처리하지 않은 시료의 표면을 기준으로 250[°C]에서 굴곡의 변화가 일부 확인되고 있다. 열처리하지 않은 페놀수지와는 다른 일부 함몰되고 돌출되

어 전체적으로 굴곡이 있는 형태의 음영이 관찰되었다. 350[°C]에서 열처리된 시료는 크랙(crack)이 생기고 일부 무기재료가 밖으로 돌출되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 충전재 중 주재료보다 열에 강한 재료가 연소되지 않고 남아 있는 것으로 판단된다.

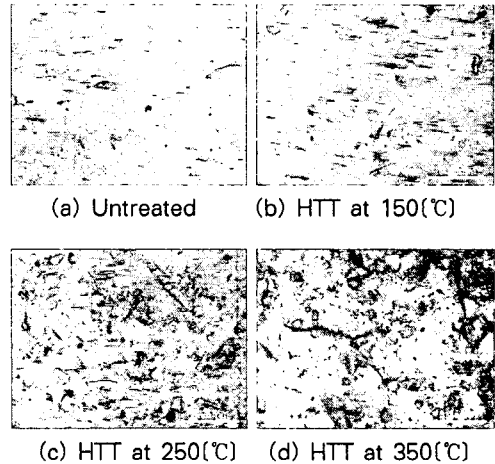


그림 7. 금속현미경을 이용한 표면확대
Fig. 7. Surface magnification using an metallurgical microscope

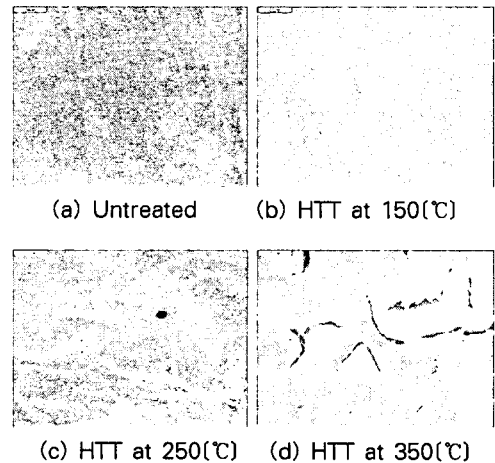


그림 8. 열처리 후 페놀수지의 SEM 이미지
Fig. 8. SEM images of phenolic resin after HTT

그림 8은 주사전자현미경을 이용하여 이미지를 촬영한 것이다. 광학현미경에서 촬영되지 않은 충전재가 돌출되어 나온 것을 확인하였다. (b)는 150[°C]에

열처리된 페놀수지 표면에서의 방전 특성과 구조분석

서 열처리한 시료의 표면으로 상태가 확연하게 열화되는 것을 확인할 수 있다. (c)는 250[°C]에서 열처리된 시료의 표면으로 내부의 충전재가 밖으로 이동하거나 충전재의 열적 특성에 의해 주변이 기화되어 조금씩 갈라지는 형태를 볼 수 있다. (d)는 350[°C]에서 열처리된 시료로서 연소된 부분을 중심으로 크랙(crack)이 발생한 것을 확인하였다.

4.3 시차열에 의한 열반응 특성

그림 9는 열처리한 시료의 열 패턴을 분석하기 위해 실시한 것으로 열처리 온도에 따른 흡열 및 발열 피크곡선이다. (a)는 열처리되지 않은(Untreated) 시료로서 333.4[°C]와 495.7[°C]에서 발열피크가 나타나는 것을 알 수 있다. 열처리되지 않은 시료에서는 충전재로 가장 많은 부분을 차지하는 목재분말의 발열피크와 주재료인 페놀수지의 발열피크가 같이 나오는 것을 확인할 수 있다. 또한 이러한 패턴은 각각의 열처리된 시료에서도 거의 유사한 발열피크가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. (b)는 150[°C]에서 열처리된 시료로서 337.0[°C]와 499.1[°C]에서 발열피크가 확인되었다. 150[°C]까지 열처리된 시료에서는 열처리되지 않은 시료와 많은 차이를 보이지 않는 것을 확인하였다. (c)는 250[°C]에서 열처리된 시료

로서 발열피크는 340.0[°C]와 450.8[°C]에서 각각의 발열피크가 나타났다. 열처리되지 않은 시료와 비교하여 두 번째 발열피크가 약 40[°C] 이상 차이가 나는 것을 알 수 있다. (d)는 350[°C]에서 열처리된 시료로서 약 340[°C] 근처의 발열피크는 거의 없어져 있고 두 번째 발열피크도 446.1[°C]로 열처리되지 않은 것과 비교하여 온도가 낮아진 것을 알 수 있다. 페놀수지의 특성상 발열피크는 크게 2개소에서 발생하고 그 영향을 충전재의 역할을 하고 있는 목분과 주재료인 페놀수지의 것으로 확인되었다.

5. 트래킹에 의한 탄화 패턴 특성

5.1 페놀수지의 트래킹에 의한 열확산

그림 10은 전압과 전류변화에 따른 변화에 대해 고속카메라를 이용하여 이미지를 촬영한 것이다. 트래킹열화 과정 중 (c)에서 가장 큰 발광을 보이는 것을 확인할 수 있다. (a)는 전극과 전극사이에 건조대와 미소불꽃방전이 진행된다 완전한 도전로가 형성되면서 탄화도전로가 형성된 상태이고 (b)는 (a)에서부터 24[msec]의 시간이 흐른 후 표면에 있는 재료 일부가 불꽃을 형성하여 비산되는 것을 보여준다. (c)는 가장 큰 발광이 있을 때를 촬영한 이미지로 (a)를 기준으로 40[msec] 후에 발생하였다. (d)는 가장 큰 발광이 있을 후 80[msec]의 시간이 흘러 안정된 화염이 형성되어 탄화도전로가 진전되는 것을 확인할 수 있다.

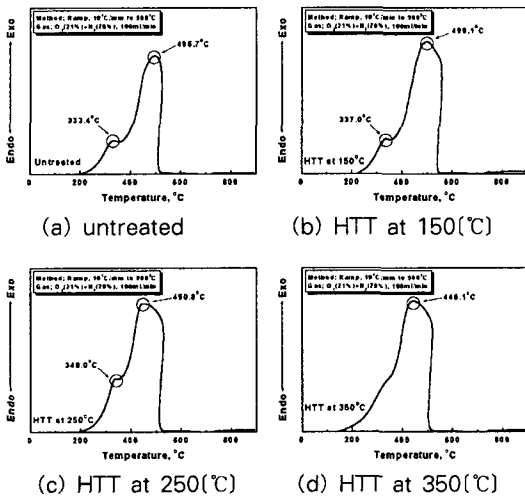


그림 9. 열처리온도에 의한 시료의 시차열 곡선
Fig. 9. DTA curves of sample by HTT

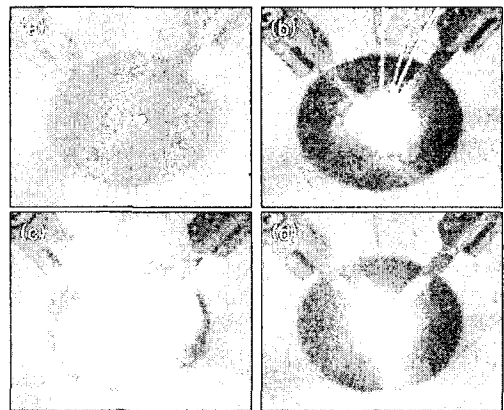


그림 10. 표면방전 과정
Fig. 10. Process of surface discharge

또한 (c)에서 (d)까지 흐르는 동안 크고 작은 섬광이 50여 회 발생하였고 반복적인 실험결과에서도 유사패턴이 나타나는 것을 알 수 있었다. 유기질 절연재료가 열에 의해 탄소가 흑연질로 바뀌는 것은 탄화도전로가 완전히 형성된 (a)에서부터 시작되는 것으로 탄화물 결정구조도 짧은 시간내에 많은 열에너지로 바뀌는 (b)와 (c)에서 다량의 흑연질이 형성되는 것으로 추정된다.

5.2 화학적 표면구조 분석

화재가 발생 후 표면방전이 발생하여 열화되는 과정을 모델링하였다. 시료는 열처리하여 일정한 조건으로 트래킹이 발생할 때까지 전압을 인가하였다. 그림 11에서 그림 14는 탄화된 부분을 적외선분광기를 이용하여 흡광피크를 비교한 것이다.

그림 11은 열처리되지 않은 시료의 전극간 표면방전에 의해 탄화된 외형과 적외선흡광스펙트럼을 비교한 것이다. 탄화도전로를 중심으로 크랙이 진전된 것을 볼 수 있다. 이때의 표면을 적외선분광기에 의해 취득한 스펙트럼은 탄화된 부분과 탄화되지 않은 부분으로 나누어 스펙트럼을 비교하였다. 탄화되지 않은 경우 1619.5[cm⁻¹], 1517.4[cm⁻¹], 1279.7[cm⁻¹], 1025.4[cm⁻¹]에서 페놀수지의 원래 형태의 적외선 흡광에 의한 스펙트럼이 나타난다. 트래킹에 의해 탄화된 시료는 1507.0[cm⁻¹], 1018.6[cm⁻¹]에서 흡광피크가 나타났다. 따라서 1619.5[cm⁻¹], 1279.7[cm⁻¹]의 흡광피크가 탄화된 후 나타나지 않는 것을 확인하였다.

그림 12는 150[°C]에서 열처리된 시료를 이용하여 극간 표면방전 시킨 것으로 극간 방전된 중간부분에서 아주 큰 크랙이 나타난 것을 볼 수 있다. 크랙이 형태도 그림 11의 경향과 다른 불규칙한 형태를 보여준다. 적외선 흡광스펙트럼은 열처리만 된 곳에서는 1654.0[cm⁻¹], 1516.8[cm⁻¹], 1284.3[cm⁻¹], 1027.3[cm⁻¹] 등의 흡광피크가 나타났다. 탄화도전로가 있어 탄화된 부분은 그림 11에서 나타난 흡광피크와 유사한 형태를 보였다.

그림 13은 250[°C]에서 열처리하여 표면방전시킨 시료로 외형은 그림 12에서 보다 큰 크랙과 탄화도전로의 중간 부분에서 탄화에 의한 균열이 생긴 것

을 확인할 수 있다. 적외선 흡광피크를 보면, 열처리된 표면에서 1735.7[cm⁻¹], 1695.1[cm⁻¹]에서 이중 흡광피크가 나타난 것을 확인하였다. 또한, 1495.9[cm⁻¹], 1335.9[cm⁻¹], 1026.5[cm⁻¹] 등에서 각각 흡광피크가 나타났다. a 스펙트럼에서도 부드러운 형태의 1600.7[cm⁻¹], 1472.1[cm⁻¹]에서 각각 흡광피크가 나타났는데 이는 열처리에 의해 표면이 산소와 탄소의 화학적 재결합이 발생한 것으로 추정된다.

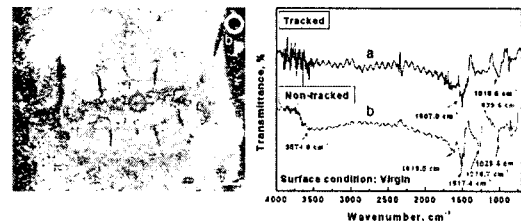


그림 11. 정상시료의 표면방전과 IR 스펙트럼
Fig. 11. Surface discharge and IR spectrum of normal specimen

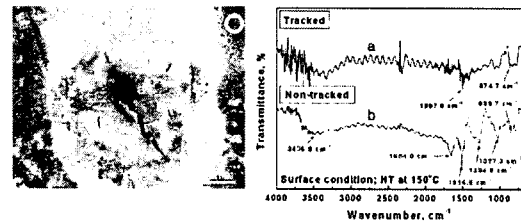


그림 12. 150[°C]에서 열처리된 시료의 표면방전과 IR 스펙트럼
Fig. 12. Surface discharge and IR spectrum of specimen as HTT changes at 150[°C]

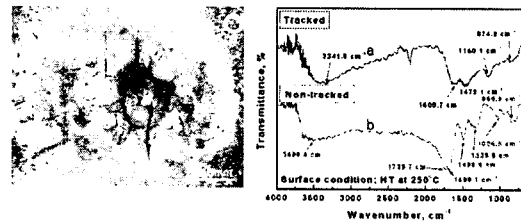


그림 13. 250[°C]에서 열처리된 시료의 표면방전과 IR 스펙트럼
Fig. 13. Surface discharge and IR spectrum of specimen as HTT changes at 250[°C]

그림 14는 350[°C]에서 열처리된 후 전극간 표면방전이 된 시료이다. 전극간 탄화도전로를 중심으로 많은 균열이 발생하였고 전극이 있던 자리에서도 균

열처리된 페놀수지 표면에서의 방전 특성과 구조분석

열이 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 열처리되어 탄화질로 된 페놀수지의 표면을 방전시킨 것으로 물리적으로 약화된 상태에서 순간 높은 열이 발생하여 나타난 것으로 탄화도전로에서 탄화질 부분이 흑연질로 바뀐 것을 알 수 있다. 열처리만 된 부분에서의 흡광피크를 보면 1731.1[cm⁻¹], 1683.7[cm⁻¹], 1488.8[cm⁻¹], 1338.1[cm⁻¹], 1029.0[cm⁻¹] 등이 확인되고 특히 1731.1[cm⁻¹], 1683.7[cm⁻¹]의 두 흡광피크가 크게 나타났고 나머지 흡광피크는 줄어드는 경향을 보였다. 탄화도전로가 형성된 부분은 1506.9[cm⁻¹]와 1416.4[cm⁻¹]에서 흡광피크가 나타났고 992.7[cm⁻¹]에서 흡광피크가 확인되었다.

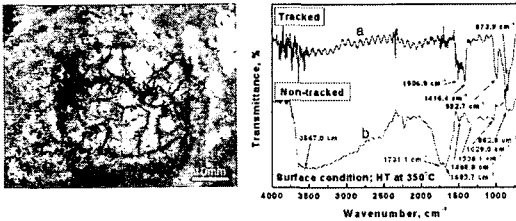


그림 14. 350[°C]에서 열처리된 시료의 표면방전과 IR 스펙트럼

Fig. 14. Surface discharge and IR spectrum of specimen as HTT changes at 350[°C]

열처리되지 않은 시료는 극간에 탄화도전로가 형성된 부분이 돌출되어 있으나, 150[°C]에서 열처리된 시료는 약간의 돌출흔적만 있고 250[°C], 350[°C]에서 열처리된 시료는 탄화도전로가 형성된 부분을 중심으로 함몰된 경향을 나타냈다. 이는 열적인 영향을 받은 시료가 CO, CO₂, C_l 등의 연소가스가 배출되어 열적 영향을 받지 않은 시료보다 상대적으로 조적이 이완되어 표면방전이 발생되었을 때 가스가 발생하여 빈 공간만큼 함몰된 것으로 판단된다. 반대로 열적인 영향을 받지 않은 시료는 표면방전에 의해 열적인 영향을 받으면서 조적이 이완되기 시작하여 가장 열적인 영향이 많은 부분으로 돌출되기 시작한 것으로 판단된다. 열처리 온도가 높을수록 트래킹이 발생하면 더 많은 크랙과 탄화가 발생하는 것을 확인하였다.

탄화도전로가 형성된 시료에 대해 적외선 흡광피크를 표로 하여 비교하면 표 1과 같았다. 표에서는

열처리와 극간 표면방전에 의해 형성된 탄화도전로의 경향성 분석이 가능하였다. 열처리되지 않은 시료에서 탄소와 탄소의 이중결합, 벤젠고리, 탄소와 산소의 단일결합, 탄소와 수소의 단일결합 등이 확인되었다. 250[°C]에서 열처리된 시료에서는 약 1730[cm⁻¹]와 1635[cm⁻¹]에서 산소와 탄소의 이중결합이 재결합된 것을 알 수 있다. 따라서 열처리되면서 페놀수지의 화학적 결합이 끊어지고 재결합된 과정을 확인할 수 있었다. 또한 탄화도전로가 형성된 시점이 외부 열에 의해 탄화된 후와 외부 열에 의한 영향이 없을 때의 구분은 표면이 250[°C] 이상의 열처리에서 1600에서 1400[cm⁻¹]에서 두 개의 흡광피크가 나타나는 것으로 판정이 가능하였다.

표 1. 다양한 샘플의 IR 흡수피크

Table 1. IR absorption peaks of various samples

HTT[°C]	Non-tracked samples[cm ⁻¹]	Tracked samples[cm ⁻¹]
Untreated	1619.5(C=C stretching vib.)	
	1517.4(benzene ring's bending vib.)	1507.0
	1278.7(C-O stretching vib.)	
	1025.4(C-H stretching vib.)	1018.6
150	1654.0(C=C stretching vib.)	
	1516.8(benzene ring's bending vib.)	1507.0
	1284.3(C-O stretching vib.)	
250	1027.3(C-H stretching vib.)	
	1735.7, 1685.1(C=O stretching vib.)	
	1495.9(benzene ring's bending vib.)	1600.7, 1472.1
350	1335.9(C-N stretching vib.)	
	1026.5(C-H stretching vib.)	1160.1
	1731.1, 1683.7(C=O stretching vib.)	
	1488.8(benzene ring's bending vib.)	1506.9, 1416.4
	1338.1(C-N stretching vib.)	
	1029.0(C-H stretching vib.)	992.7

6. 결 론

유기질 절연재료 중 저전압기기의 외함재료로 가장 많이 이용되는 페놀수지는 외부열에 의해 탄화질로 변화되는 것과 전기적 원인에 의해 흑연질로 변화되어 재료분석을 통한 방법으로 그 원인을 규명하고 외부 열에 의한 영향을 받은 후 누설전류가 흘렀을 때의 과정을 규명하였다.

저압용 외함재료로서의 페놀수지를 정밀분석하여

외부 열에 의해 탄화가 되면 비정질 형태의 탄화질이 되고 전기적 원인에 의해 탄화가 되면 결정성 탄소의 도전성을 가진 흑연질이 되는 것을 입증하였다.

외부 열에 의해 탄화질이 되었어도 전기적 원인에 의해 방전이 되면 흑연질의 형태로 바뀌는 것을 알 수 있었다.

전기사고의 경우 전기설비의 트리플 요소에 의한 아크 발생으로 시작하여 절연재료 또는 주변의 가연물을 연소시키며 화재 등으로 진전된다. 아크열의 특성을 이해하고 그에 따른 재료변화를 분석하여 전기사고 원인 분석에 이용하는 것이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구는 산업자원부 전력산업기반기금의 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] 송길목, 노영수, 곽희로, "트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화특성", IEEE Trans., 53C권, 1호, pp.1~7, 2004.01.
- [2] Kil-Mok Shong, Chung-Seog Choi, Hyung-Rae Kim, Dong-Woo Kim, Hee-Ro Kwak, "A Study on the Electric Fire Analysis of Insulating Materials Due to the Tracking Deterioration", 2002 ACED & K-J Symposium, pp.606~609, 2002.
- [3] Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyung-Rae Kim, Dong-Woo Kim, "A Study on the Characteristics of Tracking Deterioration between Electrodes on Phenolic Resin used for Low Voltage", ICEE 2002 conference.
- [4] Peter H. F. Morshuis, "Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharge: Some Thoughts on Progress Made and Where to Go Now", IEEE Trans. on DEI, Vol. 12, No. 5, pp.905~913, 2005.
- [5] B. X. Du, Y. Yamao, "Effects of Atmospheric Pressure on dc Resistance to Tracking of Polymer Insulating Materials", IEEE Trans. on DEI, Vol. 12, No. 6, pp.1162~1171, 2005.
- [6] H. Zang, R. Hackam, "Electrical Surface Resistance, Hydrophobicity and Diffusion Phenomena in PVC", IEEE Trans. DEI, Vol. 6, No. 1, pp.73~83, 1999.
- [7] S. Kumagai, N. Yoshimura, "Impact of Thermal Aging and Water Absorption on the Surface Electrical and Chemical Properties of Cycloaliphatic Epoxy Resin", IEEE Trans. DEI Vol. 7, No. 3, pp.424~431, 2000.
- [8] S. Kumagai, N. Yoshimura, "Tracking and Erosion of HTV Silicone Rubbers of Different Thickness", IEEE Trans. DEI Vol. 8, No. 4, pp.673~678, 2001.
- [9] B.X. Du, "Discharge Energy and dc Tracking of Organic Insulating Materials", IEEE Trans. DEI Vol. 8, No. 6, pp.897~901, 2001.
- [10] J. Montesinos, R. S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury,

"Mechanism of Brittle Fracture in Nonceramic Insulators", IEEE Trans. DEI Vol. 9, No. 2, pp.236~243, 2002.

- [11] W. Diesendorf Dr. Tech. Sc, "Insulation Co-ordination in High-voltage Electric Power Systems", Butterworth & Co. Ltd., pp.27~46, 1974.
- [12] D.S.Miller, "Discharge Characteristics", AA. Balkema, Rotterdam, pp.3~151, 1994.
- [13] J.S.T. Looms, "Insulators for High Voltages", Peter Peregrinus Ltd., pp.102~107, pp.118~131, 1988.
- [14] L.L. Alston, "High-voltage Technology", Oxford University press, pp.17~59, pp.158~195.
- [15] L. Warren, "Testing for Tracking", University of Manchester Institute of Science and Technology, pp.3/1~3/13, 1990.
- [16] Won-Chun Oh, "Historical Background on the Electrical Properties of Carbon materials", Carbon science V3, N2, pp.99-107, 2002.6.
- [17] J.M. Ripalda 외 5, "Resonant inelastic x-ray scattering in amorphous carbon nitride".
- [18] Malcolm P. Stevens, "Polymer Chemistry an Introduction 3Ed", Oxford, pp.395~404, 1999.
- [19] IEC Publ. 112, "Recommended Method for Determining Comparative Tracking Index of Solid Insulating Materials under Moist Conditions", 2nd Ed., 1971.
- [20] ASTM D 3638, "Standard Test Method for Comparative Tracking Index of Electrical Insulating Materials".

◇ 저자소개 ◇

송길목 (宋信穆)

1967년 3월 31일생. 1994년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기제어시스템공학과 졸업(석사). 2006년 현재 동 대학원 박사과정 수료. 1996년~현재 한국전기안전공사 부설 전기안전연구원 재해예방연구그룹 선임연구원.
Tel. (031) 580-3033, Fax. (031) 580-3045
E-mail : natasder@kesco.or.kr

노영수 (盧永秀)

1961년 4월 1일생. 1984년 서울대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1996년 한국전기연구원 연구원. 2001년 미국 캘리포니아주립대(Davis) 응용과학과 졸업(박사). 현재 숭실대학교 전기제어시스템공학과 교수.
Tel. (02) 820-0663, Fax. (02) 817-7961
E-mail : yroh@ssu.ac.kr

곽희로 (郭熙魯)

1942년 3월 1일생. 1967년 서울대 전기공학과 졸업. 1978년 호주 New South Wales 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 중앙대 대학원 졸업(박사). 2002년 대한전기학회 학회장 역임. 현재 숭실대학교 부총장 및 전기제어시스템공학과 교수.
Tel. (02) 820-0644, Fax. (02) 817-7961
E-mail : hrkwak@ssu.ac.kr