

# 누전차단기 외함 전원측 단자사이의 트래킹에 의한 탄화특성 분석 The Analysis of the Carbonization Properties between RCD Source Terminals Deteriorated by Tracking

최충석<sup>†</sup> · 송길목 · 김동우

Chung-Seog Choi<sup>†</sup> · Kil-Mok Shong · Dong-Woo Kim

한국전기안전공사 부설 전기안전연구원  
(2003. 6. 24. 접수/2003. 11. 17. 채택)

## 요 약

본 논문은 누전차단기 외함 전원측 단자사이에서 발생하는 전기화재 원인에 대한 분석을 연구하였다. 누전차단기는 보호범위의 전기시설물에서 누전 또는 과부하에 의한 차단을 목적으로 한다. 누전차단기의 전원측 단자는 트래킹에 의해 화재로 쉽게 이어질 수 있다. 따라서, 누전차단기의 재현실험을 통해 트래킹 시료(E<sub>1</sub>)와 화재현장에서 트래킹된 것(S<sub>1</sub>)을 비교분석하여 전기화재의 원인을 밝히는데 중요한 자료가 되도록 하였다. 실험은 IEC Publ. 112법을 응용하여 실시하였고 누전차단기에서 미소방전과 건조대가 발생한 후 소손되는 것을 확인하였다. E<sub>1</sub>에서 전원측 단자간의 절연저항은 약 25.7 Ω이고 S<sub>1</sub>의 절연저항은 약 58.6 Ω이었다. E<sub>1</sub>의 발열피크는 491.0°C와 603.2°C였다. 603.2°C에서의 발열피크는 트래킹에 의한 것이다. S<sub>1</sub>의 발열피크는 593.1°C에서 나타났다. 트래킹에 의해 변화된 시료는 IR 흡수스펙트럼에서 1590 cm<sup>-1</sup>에서 흡광피크가 나타나지 않았다.

## ABSTRACT

In this paper, we studied on the characteristics of RCD(Residual Current Device) case deteriorated by tracking, and compared the tracked samples between in the site of fire(S<sub>1</sub>) and in the reappearance experiment(E<sub>1</sub>). This experiment is applied to IEC Publ. 112 method. Electrical fire by tracking occurred after scintillation and dry-band generated. The insulation resistance between source terminals of RCD case was about 25.7 Ω in E<sub>1</sub> and the resistance was about 58.6 Ω in S<sub>1</sub>. The exothermic peaks of E<sub>1</sub> appeared at 491.0°C and 603.2°C. The exothermic peak at 603.2°C was shown by tracking. And the exothermic peak of S<sub>1</sub> appeared at 593.1°C. In spectrum of S<sub>1</sub> and E<sub>1</sub>, absorption peak didn't appear at near 1590 cm<sup>-1</sup>.

**Keywords :** Electrical fire, RCD case, Scintillation, Source terminals, Tracking

## 1. 서 론

전기설비의 대용량화 및 다양한 전기기계기구의 보급에 따라 편리성이 증가되고 더불어 전기안전에 대한 주의가 더욱 요구되고 있다. 전기사고는 장시간 피로 누적에 의한 사고가 많아 막대한 인적, 물적 피해를 초래하고 있다. 전기화재는 설비의 위치에 따라 옥외와 옥내설비사고로 분류되는데 옥내사고의 대부분은 설비 사고에 의한 정전 등과 같은 옥외사고와는 달리 화재

와 감전 등 2차, 3차 사고가 더 큰 영향을 초래한다.<sup>1,2)</sup> 따라서, 설비사고의 원인을 분석하여 예방에 필요한 대책을 마련하는 것이 중요한 과제라 하겠다. 특히, 전기화재는 관리가 소홀한 시간에 목격자가 없는 상태에서 발생하기 때문에 원인 분석에 대한 정확한 판정 근거 자료를 확보하기 위한 노력이 요구된다. 외국의 경우 전기화재에 대한 전문적인 연구가 활성화되어 있고 국가의 정책적인 기반을 중심으로 장기적으로 집중 투자되어 상당부분 가시적인 연구성과를 거두고 있다. 국내의 경우 전기화재에 대한 전문적인 연구나 분석을 통하여 이에 대한 대응전략과 연구의 방향성 제시가

<sup>†</sup> E-mail: ccseog@kesco.or.kr

필요한 실정이다.

본 연구는 절연재료의 표면에 이물질이나 수분이 쌓여 누설전류가 발생한 후 줄열에 의해 절연파괴로 이어지는 트래킹 화재의 발생과정을 재현하고, 절연재료 분석에 의한 전기화재 원인 규명을 통해 전기화재 판정기법을 제시하였다.

## 2. 이 론

누전차단기의 외함재료로서 주로 이용되는 페놀수지는 절연성능이 좋고 저렴하며 성형이 쉬워 차단기류, 콘센트, 플러그 등의 저압용 전기기구의 외함 절연재료로 많이 이용되고 있다. 페놀수지의 최고허용온도는 약 180°C이고 발화온도는 456°C이다.<sup>3,4)</sup>

Fig. 1은 벤젠고리(benzene ring)에 수산화기(-OH)가 결합한 형태의 정상적인 페놀수지가 급격한 고온 및 희박한 산소상태의 조건에서 결정질 형태의 다층구조로 흑연화되는 과정을 나타낸 것이다.

유기질재료인 경우 약 500°C이하에서 탈수, 탈산으로 일산화탄소, 이산화탄소 등의 가스가 발생하고 탄화재료인 경우 600~700°C에서 이산화탄소 등 가스가 발생하여 발열반응의 차이가 있다. 이는 절연성이 좋은 재료의 표면에 전자이동이 가능한 통로가 형성되어 전기적 원인에 의해 흑연질로 바뀌는 영향을 분석하는데 중요한 자료가 된다.<sup>5,6)</sup> Table 1은 탄소의 동소체에 대한 절연특성과 구조에 대해 구분한 것으로 유기절연재료는 구조가 비정질형 탄소로서 절연성이 높다. 흑연질은 도전성을 가지고 있으며 구조는 결정성을 가지고 있다. 다이아몬드는 탄소의 구조가 결정형으로 되

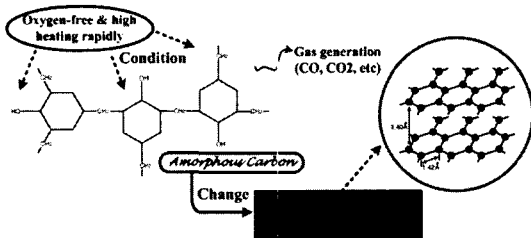


Fig. 1. Changing process of chemical structure.

Table 1. Characteristics of Carbon

Allotrope	Amorphous carbon	Graphite	Diamond
Insulation	high	low	high
Structure	amorphous	crystalline	crystalline

어 있지만 아주 높은 절연성을 가지고 있다.

탄소의 결정형태와 도전여부에 따라 특성이 달라지게 된다. 따라서, 탄화 특성 분석으로 절연파괴에 의한 전기화재 원인판정이 가능하다.

절연파괴에 의한 화재과정은 절연재료의 표면에 빗물이나 오손액, 먼지 등에 의해 누설전류가 흐르기 시작하면 미소불꽃방전과 오손액의 증발에 의한 건조대가 반복하여 발생하고 표면에 열이 발생하게 되는데 탄화 조직이 도전성을 가지면서 절연이격 거리가 줄어들고 방전하게 된다.<sup>7)</sup>

## 3. 실 험

실험에는 단상 2선식, 정격전압 AC 220 V에 정격전류는 30 A인 것으로 정격감도전류는 30 mA, 0.03초 이내에 동작하고, 전원측 단자간 거리가 약 13 mm인 누전차단기를 사용하였다.<sup>8)</sup>

Fig. 2는 220 V의 상용전압이 인가된 상태에서 1% 염수의 오손액에 의해 누설전류가 흘러 트래킹을 발생시키기 위한 실험장치를 구성한 것이다.<sup>9,10)</sup> 실험은 IEC Publ. 112법을 응용하여 1%의 염수를 분당 9방울을 누전차단기의 전원측 단자사이에 떨어뜨려 누전차단기가 트래킹에 의해 화재가 발생할 때까지 실험하였다.

Table 2는 누전차단기 외함의 샘플링 조건을 나타낸 것이다. 현장에서 수거한 외함재료는 트래킹된 부분(S<sub>1</sub>)과 외부 화재로 인해 탄화된 부분(S<sub>2</sub>)으로 구분하였고 재현실험에 의한 것은 정상부분(E<sub>0</sub>)과 트래킹에 의해 탄화된 부분(E<sub>1</sub>)으로 구분하였다.

재현실험은 주택용 전원 220 V 상용전압을 이용하여 누전차단기를 설치하고 안전저항(110 Ω)과 저항부하만으로 구성하였다. Fig. 3은 실험과정을 나타낸 것으로 사고현장에서 수거한 동일품목의 누전차단기를 설정하여 1% 염수의 오손액을 전원측 단자사이에 떨어뜨려 누설전류가 흐르도록 하였다. 표면이 트래킹된 후에 사고현장에서 수거한 누전차단기 외함재료와 재현실험을 통해 탄화된 누전차단기 외함재료는 각각의 분석기를 이용하여 분석하였다. 외형변화는 광학현미경에 의해 분석하였고, 열적인 영향을 비교·분석하기 위해 열분

Table 2. Sampling conditions of RCD case

Situation	Sampling condition		
	Virgin	Tracked sample	Flame
Reappearance experiment	E <sub>0</sub>	E <sub>1</sub>	-
The site of fire	-	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>

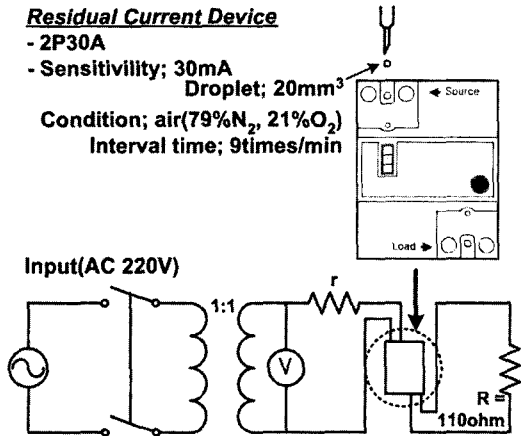


Fig. 2. Schematic of experimental system.

석기(DTA/TGA, SDT-2960, TA Ins., USA)를 이용하여 흡·발열반응과 열중량변화를 분석하였다. 표면의 화학적 구조 변화 분석은 적외선분광기(FT-IR, Spectrum GX, PerkinElmer Ins., USA)를 이용하였다.

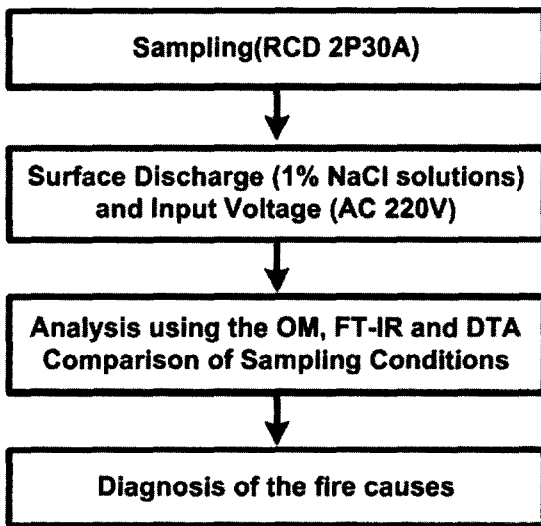


Fig. 3. Fire reappearance and analysis process.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 트래킹에 의한 화재진전

누전차단기 전원측 단자사이의 외함재료에 1%의 염수를 떨어뜨리면서 화재가 발생할 때까지 촬영하면 Fig. 4와 같았다. (a)는 전압이 인가된 상태에서의 초기상태를 보여주는 것이고 (b)는 누설전류가 흘러 건조대와

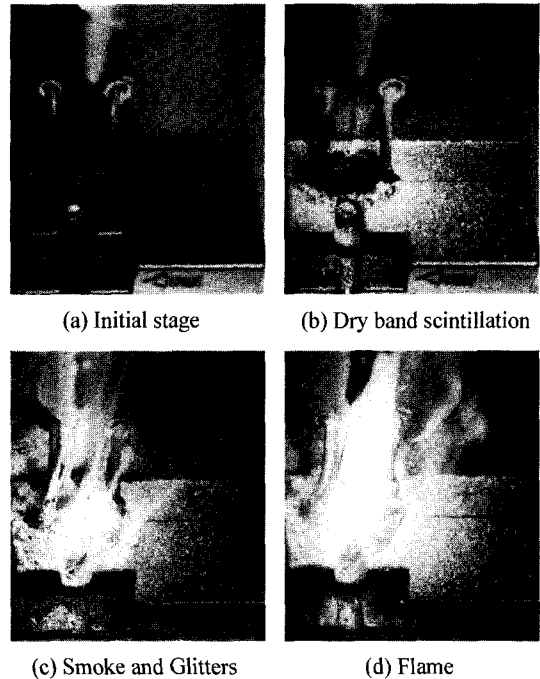


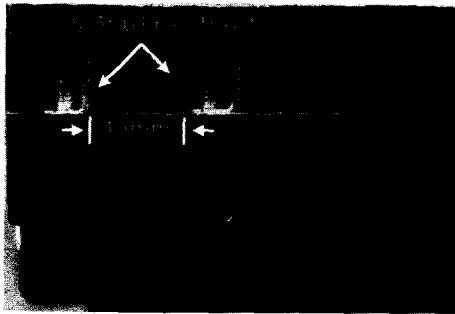
Fig. 4. Fire process between source terminals of RCD case.

미소불꽃방전이 진행되는 것을 나타내고 있다. 장시간 동안 반복하여 누설전류가 흐르고 (c)는 탄화도전로가 형성되어 연기가 발생하고 밝은 섬광을 나타낼 때를 촬영한 것이다. (d)는 트래킹에 의해 화염이 형성된 때를 나타낸 것으로 전압이 인가된 상태에서는 화염이 줄어들지 않고 지속적으로 커지는 것을 확인하였다.

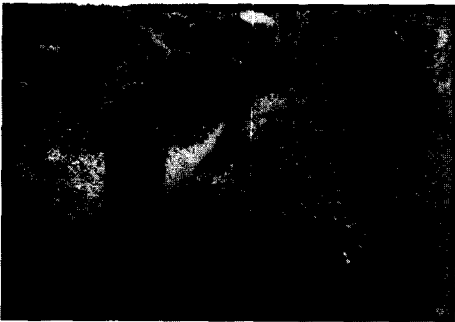
### 4.2 외형 분석

Fig. 5는 재현실험을 통해 절연파괴된 누전차단기와 화재현장에서 수거한 누전차단기의 전원측을 비교한 것이다. (a)는 정상품으로 현장에서 수거한 제품과 동일한 누전차단기의 전원측 단자를 촬영한 것이다. (b)는 사고현장에서 수거한 것으로 전원측 단자 사이에 많은 탄화흔적이 확인되었고 전체적으로 열에 의해 그을린 흔적이 나타났다. (c)는 실험을 통해 트래킹 시킨 것으로 누전차단기의 전원측 단자 사이에 탄화되어 균열된 형태를 확인하였다. (b)와 (c)에서 외함이 겹치는 부분에서 가장 큰 탄화가 형성된 것을 알 수 있었다.

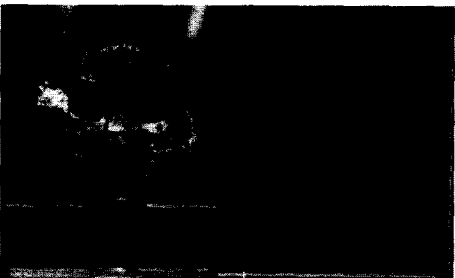
Fig. 6은 단자사이의 절연저항을 측정된 것이다. (a)는 사고현장에서 수거한 누전차단기의 전원측 단자 사이에 있는 절연저항을 측정된 것으로 약 58.6Ω의 절연저항이 측정되었다. (b)의 경우 실험에 의해 트래킹



(a) Normal



(b) RCD in the site of fire



(c) RCD tracked by experiment

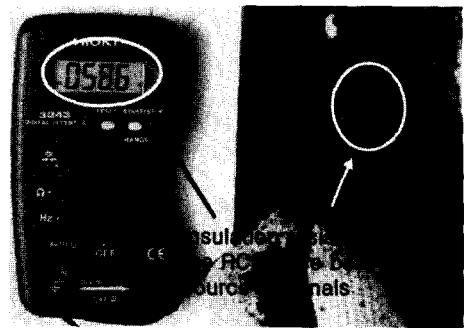
Fig. 5. Comparison of RCD case deteriorated by tracking.

된 누전차단기 전원측 단자사이의 절연저항을 측정된 것으로 약 25.7Ω이 나타났다. 따라서, (a)와 (b)는 누설전류에 의해 절연파괴되어 유기질 절연재료가 탄화되면서 도전화된 것을 알 수 있었다.

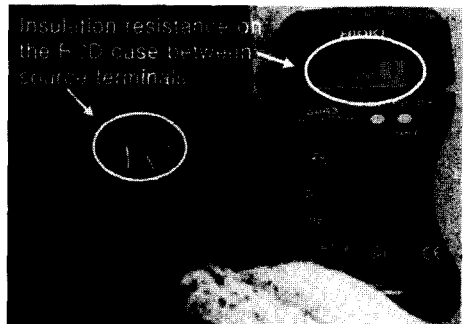
4.3 흡·발열반응에 의한 분석

절연재료가 누설전류에 의해 도전성으로 바뀌는 것은 탄화된 부분이 일부 흑연질로 바뀌기 때문이며, 흑연은 약 600~700°C 사이에서 이산화탄소나 일산화탄소로 연소된다. 이는 탄화물의 발열피크를 이용하여 탄화질과 흑연질을 구분하는 중요한 요소가 된다.

Fig. 7은 정상시료와 외부화염에 의해 탄화된 누전차단기의 외함재료를 열분석기로 분석한 것이다. (a)의



(a) RCD in the site of fire



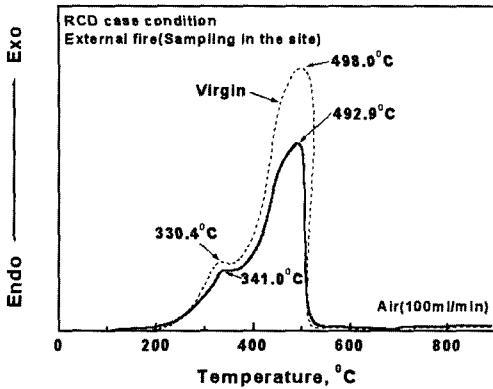
(b) RCD tracked by experiment

Fig. 6. Insulation resistance between source terminals of RCD case.

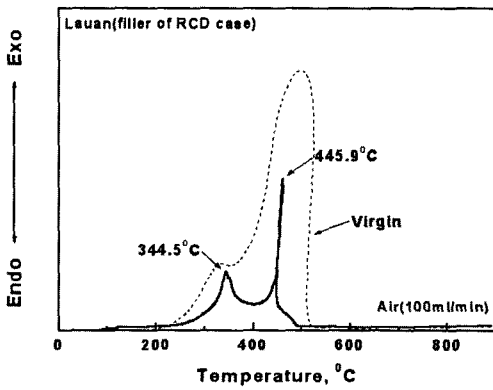
정상시료는 330.4°C와 498.0°C에서 발열에 의한 피크가 나타났고, 외부화염에 의해 탄화된 재료는 341.0°C와 492.9°C에서 각각 발열에 의한 피크가 나타났다. 열적인 영향을 받은 경우 발열피크의 크기는 다르지만 발열피크의 온도범위가 유사한 곳에서 발생한 것을 확인하였다. (b)는 누전차단기 외함 충전제인 목분(나왕)으로서 초기 발열피크와 2차 발열피크의 형태를 가지고 누전차단기 외함의 발열피크 영향이 목분에 있는 것을 알 수 있다. 페놀수지의 경우 발열피크는 약 456°C에서 나타나므로 정상시료는 목분에 의한 발열피크와 페놀수지에 의한 발열피크가 겹쳐져 있는 것을 확인할 수 있다. (c)는 재현실험에 의해 트래킹 열화된 것으로 탄화된 것으로 보이는 491.0°C에서의 발열피크와 트래킹에 의해 결정구조로 바뀐 것으로 추정되는 603.2°C에서 각각 발열피크가 확인되었다. 또한, 화재 현장에서 수거한 시료는 593.1°C에서 발열피크가 나타났으며, 탄화물의 결정구조가 바뀐 것을 확인할 수 있다.

4.4 열중량 분석

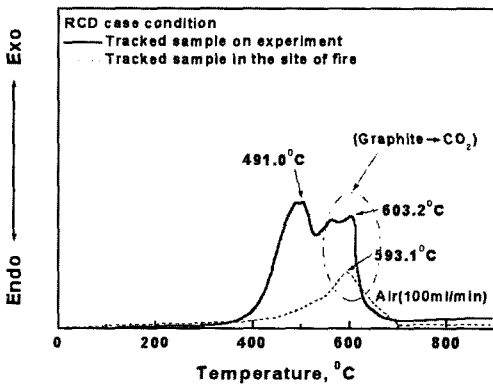
누전차단기 외함에서 외부화염에 의해 탄화된 것, 층



(a) E<sub>0</sub>, S<sub>2</sub>



(b) E<sub>0</sub>, Lauan

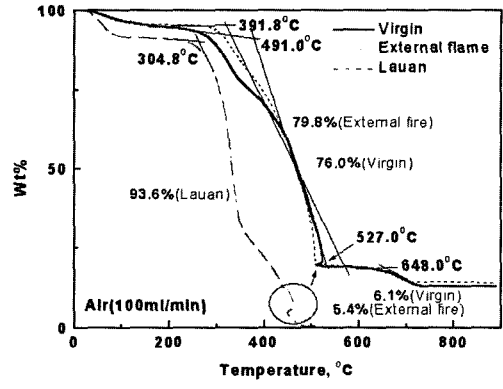


(c) E<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>

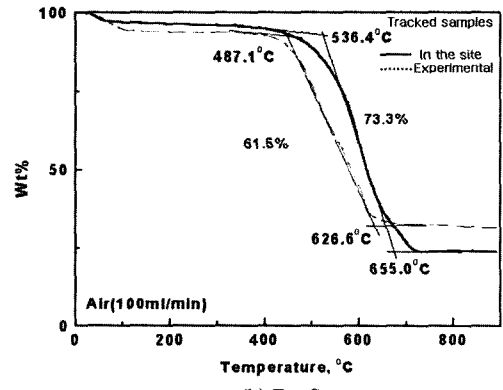
Fig. 7. DTA curves of samples.

전체로 이용되는 나왕, 트래킹에 의해 탄화된 것 등을 열중량분석기에 의해 열중량 변화를 각각 분석하면 Fig. 8과 같이 비교할 수 있다.

(a)는 정상품과 사고현장에서 수거한 누전차단기의 탄화된 부분(S<sub>2</sub>)과 나왕을 비교한 것으로 정상시료는 약 300°C에서 550°C 동안 76.0%의 초기 열중량 감소



(a) E<sub>0</sub>, S<sub>2</sub>, lauan



(b) E<sub>1</sub>, S<sub>1</sub>

Fig. 8. Thermogravimetric analysis of RCD case.

가 있고 이후 6.1%의 열중량 감소가 추가로 나타났다. 외부화염에 의해 소손된 경우에는 약 300°C에서 550°C의 열변화 동안 79.8%의 열중량 감소가 있었고 이후 약 5.4%의 열중량 감소가 추가로 나타났다. (b)는 전기적 원인에 의해 탄화된 누전차단기의 외함재료로서 화재현장에서 수거한 것과 실험을 통해 얻은 탄화물의 열중량변화 곡선을 나타낸 것이다. 화재현장에서 수거한 탄화물의 열중량변화는 73.3%, 재현실험에 의한 탄화물은 61.5%의 열중량 감소가 발생하였고 약 650°C 이후에서 나타나는 열중량 변화는 나타나지 않았다.

#### 4.5 화학적 표면구조 분석

Fig. 9(a)는 정상시료로서 1592.8 cm<sup>-1</sup>, 1436.3 cm<sup>-1</sup>, 1209.2 cm<sup>-1</sup>, 1011.5 cm<sup>-1</sup>에서 적외선 흡광피크가 확인되었다. (b)는 사고현장에서 외부 열에 의해 탄화된 누전차단기로 3320.9 cm<sup>-1</sup>, 1597.0 cm<sup>-1</sup>, 1428.0 cm<sup>-1</sup>, 1209.2 cm<sup>-1</sup>, 873.9 cm<sup>-1</sup>에서 흡광피크가 나타났다. (c)는 화재현장에서 수거한 누전차단기의 트래킹된 부분

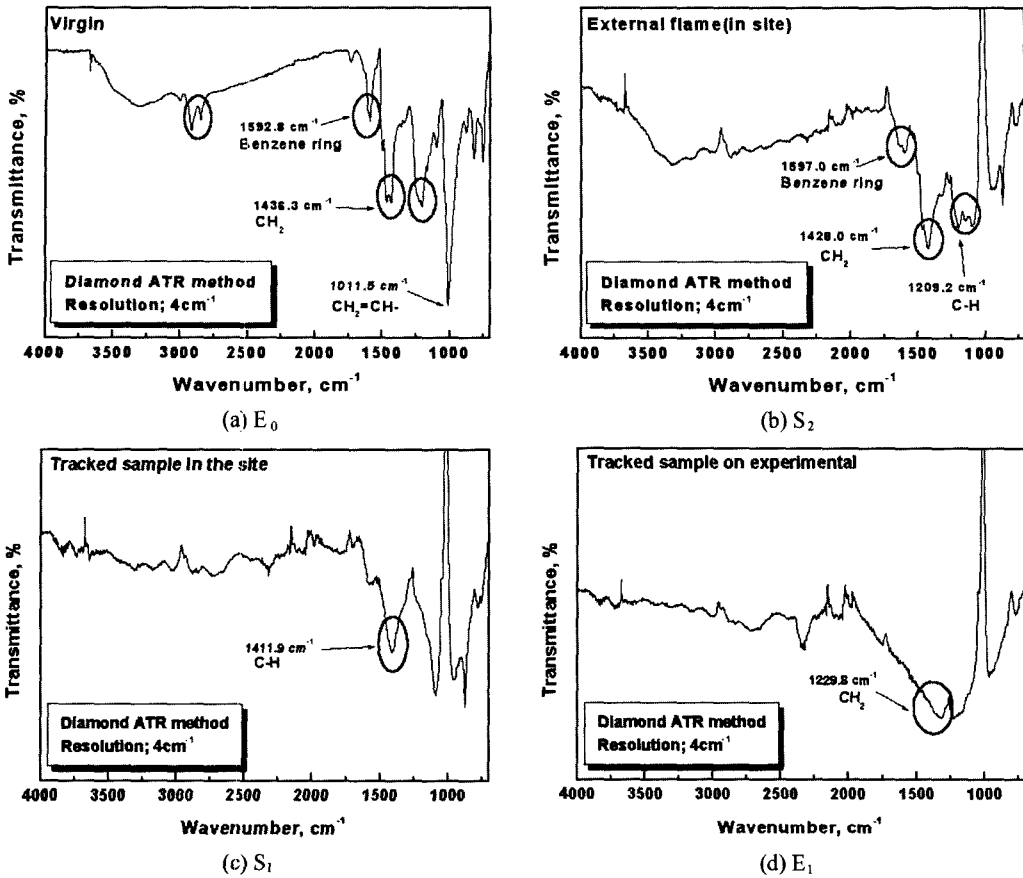


Fig. 9. IR spectrum analysis of RCD case.

으로 1411.9  $\text{cm}^{-1}$ , 1087.5  $\text{cm}^{-1}$ , 873.1  $\text{cm}^{-1}$ 에서 흡광피크가 나타났다. (d)는 재현실험에 의해 트래킹된 부분으로 1229.8  $\text{cm}^{-1}$ , 966.9  $\text{cm}^{-1}$ 에서 적외선 흡광피크가 확인되었다.

### 5. 결 론

이상과 같은 재현실험을 통한 트래킹 탄화과정과 탄화물을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 현장에서 수거한 누전차단기 단자사이의 절연저항은 약 58.6  $\Omega$ , 재현실험에 의한 경우 약 25.7  $\Omega$ 이 측정되었다.

(2) DTA 분석결과, 발열피크는 정상시료는 330.4°C와 498.0°C에서, 외부화염에 의해 탄화된 재료는 341.0°C와 492.9°C에서 나타났고, 재현실험에 의해 트래킹된 것은 491.0°C, 603.2°C에서, 화재현장에서 수거한 시료는 593.1°C에서 발열피크가 나타났으며 트

래킹에 의해 탄화된 부분이 흑연질로 바뀐 것을 알 수 있었다.

(3) TGA 분석결과, 정상시료는 약 300°C에서 550°C 동안 76.0%의 초기 열중량 감소가 있고 이후 6.1%의 열중량 감소가 추가로 있었고, 외부화염에 의해 소손된 경우에는 약 300°C에서 550°C의 열변화 동안 79.8%의 열중량 감소가 있었고 이후 약 5.4%의 열중량 감소가 있는 것을 확인하였다.

(4) 현장에서 수거한 것과 재현실험에 의해 트래킹된 절연재료를 TGA에 의해 분석한 결과, 각각 536.4°C에서부터 73.3%, 487.1°C에서부터 61.5%의 열중량 감소가 있었다.

(5) FT-IR 분석결과, 정상시료는 3309.9  $\text{cm}^{-1}$ , 1592.8  $\text{cm}^{-1}$ , 1436.8  $\text{cm}^{-1}$ , 1209.2  $\text{cm}^{-1}$ , 1011.5  $\text{cm}^{-1}$ 에서 적외선 흡광피크가 나타났고, 열열화에 의해 탄화된 시료는 3320.9  $\text{cm}^{-1}$ , 1597.0  $\text{cm}^{-1}$ , 1428.0  $\text{cm}^{-1}$ , 1209.2  $\text{cm}^{-1}$ , 873.9  $\text{cm}^{-1}$ 에서 흡광피크가 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 산업자원부(MOCIE) 전력산업기반기금에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyung-Rae Kim, Hyang-Kon Kim, Dong-Ook Kim, and Dong-Woo Kim, "A Study on the Flame Pattern and Electrical Properties of Electric Outlet Fired at Standby Mode", KIFSE Trans. Vol. 16, No. 1, pp.39-44(2002).
2. Chung-Seog Choi, Kil-Mok Shong, Hyung-Rae Kim, and Dong-Woo Kim, "A Study on the Characteristics of Tracking Deterioration between Electrodes on Phenolic Resin used for Low Voltage", ICEE 2002 Vol. 3, pp.1135-1138.
3. S. Kumagai, and 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).
4. J. Montesinos, R. S. Gorur, B. Mobasher, and D. Kingsbury, "Brittle Fracture in Nonceramic Insulators: Electrical Aspects of Microscopic Flaws in Glass Reinforced Plastic(GRP) Rods", IEEE Trans. DEI Vol. 9, No. 2, pp.244-252(2002).
5. Won-Chun Oh, "Historical Back-ground on the Electrical Properties of Carbon Materials", Carbon science Vol. 3, No. 2, pp.99-107(2002).
6. 이주성, "열처리온도에 따른 Soft Carbon과 Hard Carbon의 결정자 크기와 물리적 특성" 대한화학학회지, Vol. 13, No. 4, pp.395-399(1969).
7. T. Kamosawa, "Investigation on Tracking Deterioration using Electron Spin Resonance", 3rd ICPADM, pp.305-308(1991).
8. G. Biegelmeier, "Discrimination and Nuisance Tripping of Residual Current- Operated Devices in Domestic and Similar Installations", IEEE Third International Conference, pp.42-49(1988).
9. IEC Publ. 112, "Recommended Method for Determining Comparative Tracking Index of Solid Insulating Materials under Moist Conditions", 2nd Ed.(1971).
10. ASTM D 3638, "Standard Test Method for Comparative Tracking Index of Electrical Insulating Materials".