

누전차단기 절연재료의 소손 특성에 관한 연구 A Study on the Damage by Burning Characteristics of Insulating Materials of RCD

이춘하[†] · 김시국 · 옥경재* · 지승욱**

Chun Ha Lee[†] · Shi Kuk Kim · Kyung Jae Ok* · Seung Wook Jee**

호서대학교 소방방재학과, *호서대학교 안전공학과, **영남대학교 전기공학과
(2009. 1. 29. 접수/2009. 4. 16. 채택)

요 약

본 연구는 국내에서 사용되고 있는 누전차단기 외함 절연재료의 소손 특성에 대하여 연구하였다. 시료는 3개 제조사의 누전차단기 외함 절연재료를 사용하였으며, 시료의 열분해특성, 연소특성, 트래킹 특성등을 비교·분석하였다. 열분해특성은 TGA를 사용하였으며, 연소특성은 ISO5660(Fire Tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass Loss Calorimeter(FTT 사)를 사용하였고, 트래킹 특성은 고체 절연재료의 내트래킹 및 비교트래킹 지수를 측정하는 실험인 KSC IEC 60112의 기준에 따라 분석하였다. 연구결과 A제조사의 경우 내트래킹성이 가장 우수하였고, B제조사의 경우 내트래킹성이 가장 낮은 반면 350°C 이상의 고온에서 열안정성이 가장 우수하였으며, C제조사의 경우 400°C 이하의 온도에서 열안정성이 가장 우수한 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT

In this study, we study the damage by burning characteristics of insulating material of RCD (Residual Current Device) used in Korea. The insulating materials of RCD manufactured by three manufacturers are used as the sample. We compare and analyze the thermal decomposition characteristics, combustion characteristics and tracking characteristics of samples. The TGA and Mass Loss Calorimeter meeting the requirements for the ISO5660 (Fire tests-Reaction to Fire, part 1) are used for analyzing the thermal decomposition characteristics and combustion characteristics respectively. In addition, the tracking characteristics are analyzed according to standard of KSC IEC 60112 known as the test used for measuring the resistance tracking and comparison tracking indexes. The study results show that the resistance tracking property of insulating material provided by A Company is highest. Also, the test results show that the resistance tracking property of insulating material provided by B Company is lowest. However, the thermal stability of insulating material provided by this company is excellent at high temperature of above 350°C. In addition, the test results show that the thermal stability of insulating material provided by C Company is highest at temperature of below 400°C.

Keywords : Tracking, Insulating materials, RCD, Carbonic electric conductive pass

1. 서 론

전기로 인한 사고는 산업이 고도화되고 다양화 될수록 더욱 커지고 복잡화되어 가고 있다. 특히 전기사고는 장시간 피로 누적에 의한 사고가 많아 막대한 인적, 물적 피해를 초래하고 있다.¹⁾

2006년도 화재통계를 살펴보면 총 화재 31,778건 중 전기화재는 9,392건으로 29.6%의 높은 점유율을 보이고 있다.²⁾

여러 가지 형태의 전기화재 원인이 존재하지만, 가장 근본적인 원인은 어떠한 조건과 환경에서도 도체간 또는 전극간 전기적 절연을 유지하는 절연재료가 열화되면서 형성된 절연과피 경로를 통해 여러 가지 형태로 전기적 에너지가 방출되는 과정이다.³⁾

[†]E-mail: leecha@hoseo.edu

이처럼 전기로 인한 사고를 방지하기 위해, 전기설비에 배선용차단기(MCCB, Molded case circuit breaker) 및 누전차단기(RCD, Residual current protective device) 등이 사용되고 있다.⁴⁾ 현재 일반적으로 사용되고 있는 차단기의 외함 주재료는 열경화성 수지인 페놀수지를 주성분으로 하고 있다. 페놀수지는 내아크성, 내트래킹성이 약하여 외함의 오염으로 인해 표면방전이 발생할 경우 전기화재로 이어질 수 있다.^{5,6)} 전기화재는 일반화재와 달리 복잡한 에너지 전달체계를 가지고 있어서 원인규명이 어렵기⁷⁾ 때문에 전기화재의 정확한 원인 규명을 위한(감식·감정)을 위한 자료의 중요성이 부각되고 있다.

이에 본 연구에서는 현재 우리나라에서 일반적으로 사용되고 있는 주성분이 페놀수지인 누전차단기 외함 절연재료의 소손특성 등을 비교·분석하여 분전반내 차단기에서 발생하는 화재의 원인규명을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 실험

2.1 시료선정

실험시료는 Table 1과 같이 3개 제조사의 누전차단기 외함의 절연재료를 사용하였으며, 각각 A사, B사 및 C사로 구분하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

2.2.1 열 특성 분석

각 제조사의 누전차단기 외함 절연재료의 열특성을 분석하기 위해 TGA(제조사, 모델)를 사용하였다. 온도 범위는 실온에서 700°C로 설정하였으며, 승온속도는 10°C/min의 속도로 온도를 상승시키며 온도에 따른 열분해 특성을 분석하였다. 분위기 가스로는 N₂를 사용하여 100ml/min으로 흘려주었다.

Table 1. RCD at Different Companies

	A Company	B Company	C Company
Rated Voltage	AC 220V	AC 220V	AC 220V
Rated Sensitivity Current	30mA	30mA	30mA
Rated Breaking Current	1.5kA	1.5kA	1.5kA

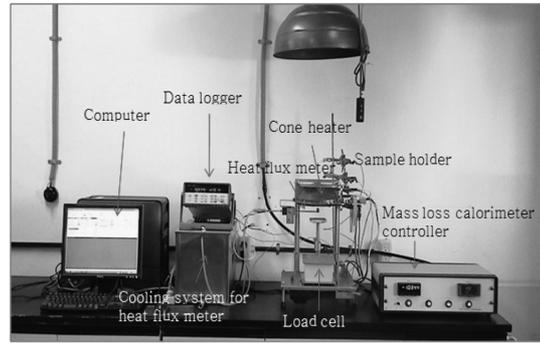


Figure 1. Experiment equipment (Mass loss calorimeter).

2.2.2 연소 특성 분석⁸⁾

각 제조사의 누전차단기 외함 절연재료의 연소특성을 분석하기 위해 ISO5660(Fire tests - Reaction to Fire, part 1)을 만족하는 Mass Loss Calorimeter(FTT사, 모델명)를 사용되었다. 실험장치는 Figure 1에 나타난 콘 형태의 복사전기히터(cone heater), 시간에 따른 시료의 무게변화를 측정하기 위한 무게측정장치(load cell), 시료홀더(sample holder), 스파크 점화장치, heat flux meter, data 수집 및 분석시스템 (Data logger와 Computer) 등으로 구성되어 있다. 실험은 복사전기히터의 바닥면과 누전차단기 스위치 상부 표면 사이 거리를 25.0mm로 조정된 후 시료홀더 위에 누전차단기를 놓고, 무게측정장치 위에 수평으로 설치하여 실제 화재실과 유사한 조건을 주기위해 상온에서부터 550°C, 650°C, 750°C의 온도로 일정하게 상승시키면서 15분 동안 복사열에 노출시켜 각 노출 온도에 따른 착화온도, 중량변화 등 연소특성을 관찰하였다. 시료에 대한 착화는 복사전기히터하부와 시료 상부의 중간에 위치한 스파크 점화장치를 이용하였다.

착화온도는 시료 표면에 K-type(φ1.0mm)의 열전대를 이용하여 매 1초 간격으로 측정하였다.

2.2.3 트래킹 특성 분석

각 시료의 내트래킹 특성을 분석하기 위해 회로는 Figure 2와 같이 구성하였다.

전원은 교류 220V, 60Hz로 하였고, 내트래킹 장비는 KSC IEC(Korea standard C International Electrotechnical Commission) 60112에 따라 제작된 것을 사용하였다. 가변저항 R은 무유도성으로 KS C IEC의 권고안인 회로의 단락 전류가 1.0±0.1A를 만족시키기 위한 것이다.

오손액은 가혹한 조건에서 열화를 가속시키기 위해 IEC(International Electrotechnical Commission) 60589⁹⁾

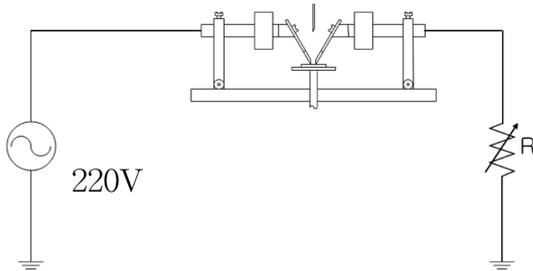


Figure 2. Experimental circuit of tracking tester.

의 기준에 따라 제조된 0.1[%]의 염화나트륨(NaCl) 수용액을 사용 되었다.

실험은 KS C IEC 60112¹⁰⁾에 따라 시료 표면에 오손액이 50방울에서 트래킹 파괴가 일어나지 않는 최대 전압을 측정하여 비교트래킹 지수로 하였다. 비교트래킹 지수는 시료 표면에 오손액이 50방울에서 트래킹 파괴가 일어나지 않는 최대전압이다. 즉, 시료 표면에 오손액을 떨어뜨려 오염시키면서 표면의 절연이 파괴되어 양전극 사이에 0.5A 이상의 전류가 2초 이상 흐를 때를 절연재료의 절연이 파괴되어 트래킹이 발생한 것을 판정하는 것이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 열 특성 분석

Figure 3은 제조사별 열중량분석 결과를 나타낸 것으로 A사의 경우 약 65°C에서부터 서서히 열분해가 시작되어 185~350°C의 온도구간에서 총중량의 62.7%가 감소하는 1차 중량 변화가 발생하였고, 350~700°C의 온도구간에서 총중량의 33.3%가 감소하는 중량변화가 발생하였다. B사의 경우 최초 60°C에서 열분해가 시작

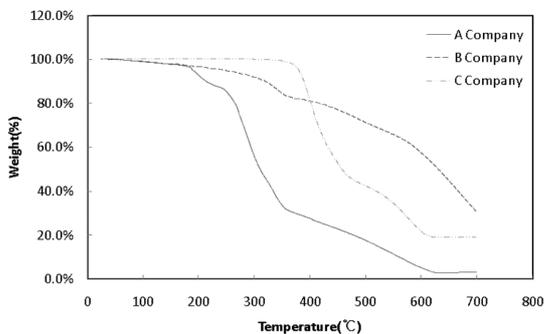


Figure 3. TG curves of insulation materials thermal degradation at different companies.

되었으며, 310~360°C의 온도구간에서 총중량의 7.73%가 감소하였고 360~700°C의 온도구간에서 총중량의 57.5%가 감소하였다. C사의 경우 330°C에서 열분해가 시작되어 480°C 사이에서 총중량의 55.2%가 감소되었으며, 480~700°C의 온도구간에서 총중량의 25.7%가 감소되었다. 각 시료의 열중량분석 결과 400°C 이하의 온도에서는 C사의 시료가 열안정성이 가장 우수하였고, 400°C 이후의 온도에서는 B사의 시료가 타제조사에 비해 열 안정성이 우수한 것을 알 수 있었다. 실험 결과 각 제조사별로 열분해 온도가 상이한 것을 확인할 수 있었으며, 이는 누전차단기 외함 절연재료의 주재료인 페놀수지 외에 첨가되는 첨가제중 안정화제의 종류와 첨가비율에 의한 것으로 사료된다. 안정화제의 종류에는 산화방지제나 과산화물 분해제 등이 있으며, 열분해 반응을 억제 시키는 효과가 있다.¹¹⁾

3.2 연소 특성 분석

Figure 4에서 6은 노출 온도별 각 시료의 표면 온도 변화를 나타낸 것이다.

A사의 경우 모든 노출 온도에서 시료 표면에 착화가 되었으며, 노출 온도에 따른 표면온도의 변화가 크게 나지 않는 것을 확인할 수 있었고, B제조사의 경우 550°C의 복사열에서는 착화가 이루어지지 않았으며, 외부 복사열의 온도가 증가할수록 표면 온도변화가 증가하는 것을 알 수 있었다. C제조사의 경우 550°C와 650°C의 복사열에 노출된 시료는 착화가 되었으나 일정시간 경과후 화염이 소멸되는 현상이 나타났으며, 750°C의 복사열에서는 착화되어 화염이 유지되는 현상을 관찰 할 수 있었다.

Table 2는 각 단계별 착화온도를 나타낸 것이다. A

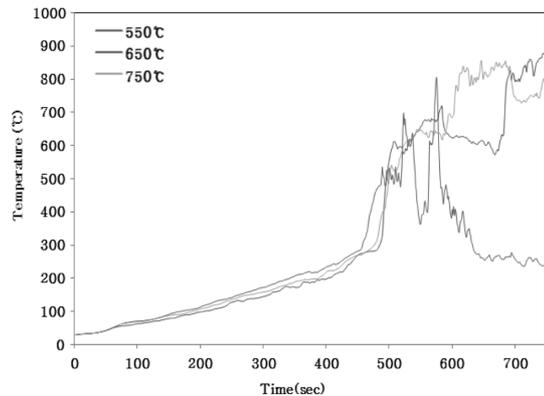


Figure 4. Surface temperature of profile during the combustion at A company.

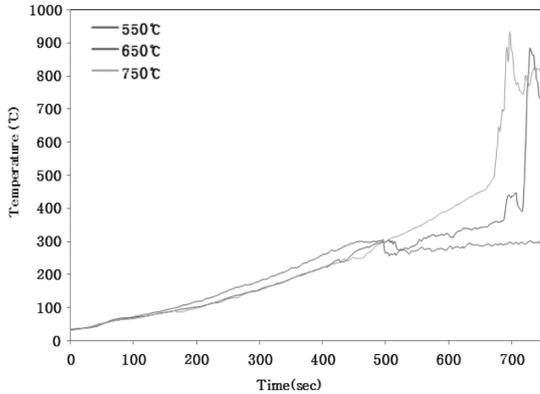


Figure 5. Surface temperature of profile during the combustion at B company.

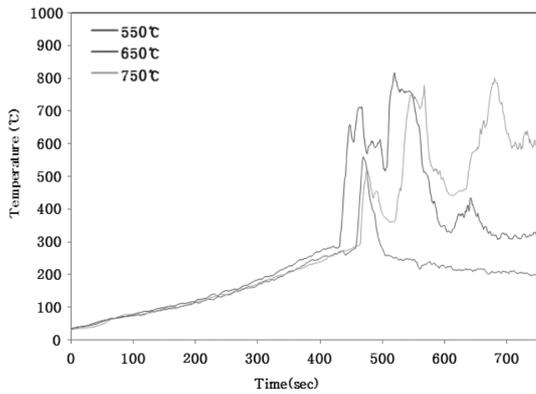


Figure 6. Surface temperature of profile during the combustion at C company.

Table 2 Ignition Temperature at Different Samples

Radiant heat	Company		
	A	B	C
550	285	×	279
650	283	442	284
750	283	452	263

사와 C사는 약 280°C에서 착화가 되었으며, B사의 경우 약 350°C에서 착화가 발생 하였다. 한편, A사, B사, C사 모두 착화시간은 미소한 차이가 나지만 노출된 복사열 증가에 따른 착화온도는 일정하게 나타났다. 이는 각각의 설정된 온도까지 도달하는 시간이 노출복사열의 온도가 높을수록 빨리 도달하기 때문인 것으로 사료된다.

Table 3 CTI Index at Different Companies

Company	CTI (V)	Growth Time (s)
A	600	21m36s
B	150	16m36s
C	150	23m18s

3.3 트래킹 특성 분석

Table 3은 각 시료별 비교트래킹 지수를 나타낸 것이다. A사의 경우 타사의 시료와는 달리 탄화도전로가 형성 되지 않고 시료표면이 침식되는 현상이 발생하여 KS C IEC 60112.의 기준에서 정하는 바와 같이 시료의 두께를 3mm 이상으로 하여 50방울 이내에 시료를 관통하는 구멍이 생기는 전압을 비교트래킹 지수로 결정하였다. 실험결과 A사는 600V에서 시료를 관통하는 구멍이 생성 되었고, B사와 C사의 경우 시간의 차이는 있으나 두 제조사 모두 비교트래킹 지수는 150V로 나타났다. 비교트래킹 지수 분석결과 3개 시료 중 A사가 내트래킹성이 가장 우수하고, B사가 내트래킹성이 가장 낮은 것으로 나타났다. A사의 절연재료와 같이 절연재료 표면이 탄화가 되지 않고 침식이 되는 것은 절연재료의 분자구조에 기인된 것이다. 탄화로의 형성은 재료로부터 이탈한 탄소가 재료 표면에 남아있는 것으로 방전에 의한 화학변화로 인해 생성한 탄소를 소멸하는 현상도 발생한다. 따라서 탄소의 생성(formation)과 소멸(removal)의 상대적인 속도에 따라 내트래킹성이 결정된다.¹²⁾ 즉 열분해 되어 탄소를 생성하는 휘발분 생성의 에너지보다 큰 경우 탄소의 생성이 쉽게 되므로 트래킹 파괴가 일어나기 쉬워진다. A사의 절연재료가 침식현상만이 발생하는 것은 A사의 절연재료가 타사의 절연재료 보다 열분해시 휘발분 생성 에너지가 탄소를 생성하는 에너지보다 크기 때문인 것으로 사료된다.

Figure 7은 절연재료 표면에 탄화가 진행되어 탄화도전로를 형성했을 때의 형상을 나타낸 것이다. B사와 C사의 경우 양 전극 사이에서 규칙적으로 건조대가 형성이 되면서 탄화가 진행이 되어 전극의 가로방향으로 도전로가 형성이 되었으나 A사의 경우 양 전극의 사이가 아닌 전극 주변에서 불규칙적으로 건조대가 발생하고 탄화 역시 전극 중앙의 가로방향이 아닌 전극 주변에서 산발적으로 진행 되는 것을 확인 할 수 있었다.

이는 A사의 경우 휘발분의 발생으로 인해 탄소소멸 현상이 발생하여 탄화도전로가 전 구간에 걸쳐 형성되지 못하기 때문인 것으로 사료된다.

Figure 8은 각 시료별로 오염에 따른 트래킹 발생 형태를 나타낸 것이다. A사의 경우 절연재료 표면이 불

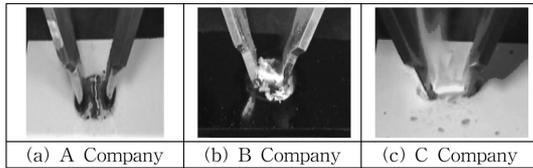


Figure 7. Generation of carbonic electric conductive pass at different companies.

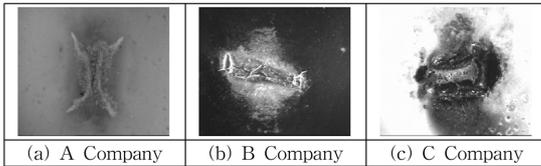


Figure 8. Generation form of tracking at different contaminate materials.

규칙적으로 침식되는 현상을 확인 할 수 있었으며, B사의 경우 트래킹이 발생한 부분이 용융된 형상이 나타났다. C사의 경우 균일하게 양전극 사이에 탄화된 흔적을 확인 할 수 있었으며 탄화된 부분의 표면이 부풀어 오르는 현상이 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 일반적으로 사용되는 여러 제조사의 누전차단기 외함 절연재료의 소손 특성을 비교·분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 각 시료의 열분해 특성을 분석한 결과 중량감소율이 A사(96%), B사(65.23%), C사(80.9%)로 B사가 열 안정성이 가장 우수한 것으로 나타났다. 이는 타사에 비해 B사의 절연재료에 안정화제의 함유량이 많거나, 성능이 우수한 안정화제의 첨가에 기인 된 것으로 사료 된다.

2) 각 시료의 연소 특성을 분석한 결과 A사의 경우 550°C 이하의 복사열에서도 착화가 되었으며, B사의 경우 착화가 발생하지 않았다. C사는 550°C와 650°C의 복사열에서 착화가 이루어 졌으나 일정 시간 경과 후 화염이 소멸되는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 열분해가 시작되는 온도는 B사가 높게 나타났으나 650°C에서도 연소가 유지 되지 않는 C사가 타사에 비해 난연성이 우수한 것을 알 수 있었다.

3) 각 시료의 트래킹 특성을 분석한 결과 내트래킹성은 A사 > C사 > B사의 순으로 A사가 내트래킹성은 가장 우수하게 나타나는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 A사의 절연재료가 타사의 절연재료 보다 열분해시

휘발분 생성 에너지가 탄소를 생성하는 에너지보다 크기 때문인 것으로 사료된다.

4) 각 시료의 트래킹에 의한 소손 형태를 분석한 결과 B사와 C사의 경우 양 전극 사이에 전극의 가로방향으로 도전로가 형성이 되었으나 A사의 경우 양 전극의 사이가 아닌 전극 주변에서 불규칙적으로 탄화가 진행 되는 것을 확인 할 수 있었다. 이는 A사의 경우 탄소소멸현상으로 인해 탄화도전로가 전 구간에 걸쳐 형성되지 못하기 때문인 것으로 사료된다.

감사의글

“이 논문은 2008년도 호서대학교의 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구입니다.”

참고문헌

1. 송길목, 노여수, 광희로, “트래킹에 의해 열화된 페놀수지의 탄화특성”, KIEE Trans, 53C, 1호, pp.1-7(2004).
2. 소방방재청, 전국화재통계분석(2006).
3. 박남규, 성균관대학교, “트래킹에 의해 변화되는 유기절연물의 표면 및 전기적 특성”, 박사학위논문, pp. 1-5(2007).
4. 김형래, 강원대학교, “저전압에 의해 소손된 페놀수지의 트래킹 특성에 관한 연구”, 석사학위논문, pp.11-12(2001).
5. 최충석, 송길목, 김동우, “누전차단기 외함 전원측 단자사이의 트래킹에 의한 탄화특성 분석”, 한국화재소방학회, Vol.17, No.4(2003).
6. 이춘하, 옥경재, 김시국, 지승욱, “오염된 누전차단기 절연재료의 트래킹 특성에 관한 연구”, 한국화재소방학회, Vol.22, No.5(2008)
7. KS C 4613, Residual Current Protective Devices (2006).
8. 박형주, 김응식, 김장환, 김동현, “복사열을 이용한 소나무와 굴참나무 낙엽의 연소특성 분석”, 한국화재소방학회 논문지, Vol.21, No.3, pp.33-41(2007).
9. IEC 60589, Methods of test for the determination of ionic impurities in electrical insulating materials by extraction with liquids.
10. KS C IEC 60112, “고체 절연 재료의 내트래킹 및 비교트래킹 지수 측정 방법”(2005).
11. Tim A. Osswald, Gorg Menges, “Materials Science of Polymers for Engineers, Hanser Gardner Pubns, pp.168-173(2003).
12. D.J. Parr and R.M. Scarisbrick, “Performance of Synthetic Insulating Material Under Polluted Conditions”, Proc. IEE, Vol.112, No.8, pp.1625-1632(1965).