

[Research Paper]

기호음료에 노출된 전기부품의 절연파괴 및 화재 위험성에 관한 연구

오택현 · 김응식^{†*}

(주)신세계 안전팀 사원, *호서대학교 안전소방학부 교수

Experimental Study on the Dielectric Breakdown and Fire Risk Assessment of Electric Parts Exposed to Various Beverages

Taek-Hyun Oh · Eung-Sik Kim^{†*}

Staff, Safety and Supervision, Shinsegae, ^{*}Professor, Division of Safety and Fire Protection, Hoseo Univ.

(Received October 30, 2018; Revised December 5, 2018; Accepted December 24, 2018)

요 약

최근 상가에서 사용되는 온장고에서 저장된 기호음료들의 유출로 인한 절연파괴로 화재가 발생한 사례가 자주 보고되고 있다. 하지만 기호음료의 전기적 특성과 음료 유출로 인한 화재 발생 원인에 대한 연구는 미비한 상태이다. 이에 본 연구에서는 이에 대한 인과 관계를 밝히고자 기호음료 32종을 선별하여 전도도 및 총 용존 고형물질(TDS)의 농도를 측정하였다. 그리고 이를 바탕으로 음료를 선별하여 전극 간 절연파괴 시험과 회로에 소자와 음료를 같이 배치한 후 모의실험을 실시하였다. 그 결과 화재 발생 가능성은 전도도가 높은 음료는 물론 낮은 음료라도 발화 가능성이 있다는 사실을 실험적으로 확인하였다. 또한, 기호 음료의 유출로 회로상에서 불꽃 방전을 일으키는 여러 조건을 발견할 수 있었다.

ABSTRACT

Refrigerator and heating cabinet fires due to the dielectric breakdown of electronic components caused by leaked beverages are being reported frequently. On the other hand, there has been little interest in measuring the electrical characteristics of beverages and studying the cause of fires. In this paper, the electrical conductivity and total dissolved solids (TDS) for 32 different beverages commonly sold in South Korea were measured to study the relationship between the electrical conductivity and dielectric breakdown. Out of these 32 beverages, based on the measurements, some characteristic beverages were selected and further dielectric breakdown tests were conducted. The results showed that the probability of a fire is higher for beverages with high electrical conductivity. Interestingly, beverages with low electrical conductivity had a high likelihood of fire depending on the type of beverage. Moreover, some conditions that cause spark ignition, which lead to fires in electronic components, were identified.

Keywords : Electrical fire, Beverage, PCB, Dielectric breakdown

1. 서 론

최근 10년간 국내에서 발생한 전체 화재사고 가운데 약 20~22%가 전기로 인한 화재사고로 집계되었다⁽¹⁾. 국가화재 통계에 2016년 기준으로 총 7,563건의 전기화재 사고 중 발화형태 순서로는 ‘절연 열화에 의한 단락’, ‘미확인 단락’, ‘트래킹에 의한 단락’ 순으로 각각 1,934건(25.6%), 1,738건

(23.0%), 882건(11.7%)이 발생하였다⁽²⁻⁴⁾. 이는 실생활에서 발생하는 전기화재의 주요인이 절연파괴에 의한 사고로 발생한다는 것을 보여준다. 절연파괴의 원인 중 액체의 절연 파괴는 그 현상이 매우 복잡하며 명확한 이론이 정립되어 있지 않아 그 문제를 해결하기가 매우 어려운 실정이다. 2013년 7월 서울시 정릉동 슈퍼에서 발생한 온장고 화재 등은 전도성을 갖는 음료수가 누출되어 온장고의 하부 권

[†] Corresponding Author, E-Mail: eskim@hoseo.edu, TEL: +82-41-540-5722, FAX: +82-41-540-5738

© 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

트를 회로 부분에서 화재가 발생한 사건이다⁵⁾. 이는 우리가 실생활에서 쉽게 접할 수 있는 각종 기호음료 또한 전기회로에 접촉할 경우 쉽게 절연파괴가 가능한 전도성을 갖는다는 것을 보여준다⁶⁾. 이러한 냉·온장고는 대중시설에서 많이 사용하는 설비로서 피해가 커질 가능성이 높다.

본 연구에서는 각종 기호음료의 전기적 저항과 이에 의한 실제 회로에서의 절연파괴 특성에 대하여 연구하고자 한다. 따라서 냉·온장고 등에 사용되는 음료들을 그 성분에 따라 분류하여 전기전도도와 Total Dissolved Solids(총 용존 고형물질, TDS)의 농도를 평가하였고, 얻어진 결과를 바탕으로 시료를 선택하고 다음과 같은 실험을 수행하였다. 우선 음료가 회로에 유출하였을 경우 저항값을 측정하기 위하여 극판의 간격과 크기, 시료의 양에 변화를 주어 실험하였다. 다음으로 음료에 노출된 전극 간의 절연 파괴 시험을 실시하여 발화 가능성을 살펴보고, 마지막으로 전자기기 내부에서 음료의 유출로 인한 화재의 원인을 파악하고자 대표적인 회로 소자들인 저항, 인덕터, 커패시터, 다이오드, 트랜지스터, 전자계전기를 Printed Circuit Board (PCB)위에 설치하고 화재 발생이 가능한 상황을 재현하여 전기화재의 원인을 추정하였다.

2. 기호음료의 전기전도도와 용존 고형물질

2.1 기호음료

실험에 사용된 음료는 냉·온장고내에 보관되는 것 중에 소비자들이 선호하는 것들로 32개를 선정하였고 식품안전기본법에 따라 다류, 커피, 과·채류, 탄산음료류, 두유류, 발효음료류, 주류, 유가공품 등으로 분류하여 실험을 진행하였다⁷⁾. 분류된 실험재료는 다음의 Table 1에 나타내었다.

2.2 전기전도도와 용존 고형물질

전기전도도는 용액 속에 함유된 TDS의 양과 밀접한 관계를 갖는다. 전기전도도는 용액 속에 존재하는 이온농도의 지시인자이고 TDS는 용액에 용해되어 있는 총 고형물의 농도로서 용액 내 유기물, 무기물, 이온, 토사 등의 용해 정도를 말한다. TDS의 농도는 전기전도도와 pH의 값에서 식(1), (2)로 나타낸다⁸⁾. 전기전도도(Gondo, PL700AL, 측정 범위: 0~199.9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 오차범위: $\pm 2\%$)는 3회 이상 반복 측정하였다. 상기 측정기는 자체 온도 센서를 갖고 있어 측정된 전기전도도가 온도보정 프로세스 식(3)⁸⁾을 거쳐 25 $^{\circ}\text{C}$ 에서 값으로 표시된다. 전도도를 측정한 5월달의 온도는 13~20 $^{\circ}\text{C}$ 의 분포를 나타내었다. pH 측정(Eutech Instrument, EcoScan pH 6, 측정범위 0.00~14.00, 오차범위 ± 0.01 pH)도 3회 이상 반복 측정하였다.

$$TDS = \text{전기전도도}(\mu\text{S}/\text{cm}, mhos/cm) \times 0.7 \quad (1)$$

25 $^{\circ}\text{C}$ pH = 7인 경우

Table 1. Various Beverages

No	Name	Type
A1	17tea, Namyang	Liquid Tea
A2	Vline Oksusutea, Kwangdong	Liquid Tea
A3	hutgaecha, Kwangdong	Liquid Tea
A4	Jin-Ssanghwa, Kwangdong	Liquid Tea
B1	Let's Be(Mild), Lottechilsung	Coffee
B2	Let's Be-Cafetime(Latte), Lottechilsung	Coffee
B3	Georgia(Original), Cocacola	Coffee
B4	Cantata(Sweet Americano), Lottechilsung	Coffee
C1	Nature is Fresh Apple, Woongjin	F&V Drink
C2	Nature is 90day Tomato, Woongjin	F&V Drink
C3	Nature is 790day Aloe, Woongjin	F&V Drink
C4	Nature is 210day Mandarine, Woongjin	F&V Drink
D1	Pepsi, Lottechilsung	Carbonated Drink
D2	Seagram's(Lime), Cocacola	Carbonated Drink
D3	Milkis, Lottechilsung	Carbonated Drink
D4	Chilsungcider, Lottechilsung	Carbonated Drink
D5	Hot6, Lottechilsung	Carbonated Drink
E1	Vegemil(Sweet), Dr.Chung's Food	Processed Soybean Milk
E2	Vegemil(A), Dr.Chung's Food	Processed Soybean Milk
E3	Vegemil(B), Dr.Chung's Food	Processed Soybean Milk
E4	Yoghurt, Namyang	Yogurt Drink
F1	Pocarisweat, Donga-Otsuka	Premixed Drink
F2	Vita500, Kwangdong	Premixed Drink
F3	Mierofiber, Hyundaipharm	Premixed Drink
F4	Rice Drink, Woongjin	Premixed Drink
F5	Pine Bud Drink, Lottechilsung	Premixed Drink
G1	Chamisulsoju(Classic), Hitejinro	Korean Distilled Liquor
G2	Cass, OBbeer	Beer
G3	Walmae Carbonated Korean Makkoli, Seouljangsu	Turbid Rice-Wine
H1	Seoulmilk, Seoulmilk	Cow's Milks
H2	Seoulmilk(Chocolate), Seoulmilk	Processed Milks
H3	Banana Flavored Milk Drink, Binggrae	Processed Milks

$$TDS = \text{전기전도도}(\mu\text{S}/\text{cm}, mhos/cm) \times 0.5 \quad (2)$$

25 $^{\circ}\text{C}$ pH < 7, pH > 7인 경우

Table 2. Conductivity of Various Beverages

No	Conductivity [μS/cm]	TDS [mg/L]	No	Conductivity [μS/cm]	TDS [mg/L]
A1	231.1	115.6	D5	663.9	331.9
A2	376.7	188.3	E1	3591.9	1795.9
A3	383.4	191.7	E2	4869.4	2434.7
A4	899.3	449.6	E3	4044.3	2022.1
B1	1521.7	760.9	E4	3167.2	1583.6
B2	1892.6	946.3	F1	1953.1	976.6
B3	1179.1	589.6	F2	1706.7	853.3
B4	1128.9	564.5	F3	645.8	322.9
C1	813.7	406.9	F4	838.3	419.2
C2	2476	1238	F5	523.2	261.6
C3	686.3	343.1	G1	119.5	59.7
C4	1345.8	672.9	G2	1236	618
D1	1034.5	517.2	G3	603.3	301.6
D2	161	80.5	H1	4178.4	2089.2
D3	758.4	379.2	H2	3896.9	1948.4
D4	271.7	135.9	H3	3044	1522

$$L_t = L_{25}\{1 + a(t - 25)\} \quad (3)$$

L_t : 전기전도도(μS/cm) at T °C
 L_{25} : 전기전도도(μS/cm) at 25 °C
 a : 온도상수(0.02/°C)

측정 결과는 Table 2에 나타내었다. 전기전도도가 높은 것은 E2, H1, E3로 각각 4869.4, 4178.4, 4044.3 μS/cm로 기록되었으며, 전기전도도가 낮은 항목은 G1, D2, A1 물질로 각각 119.5, 161 μ, 231.1 μS/cm로 나타났다. 여기서 E2, H1, E3의 TDS도 가장 높게 나와 전기전도도와 TDS의 농도는 서로 비례관계에 있음을 확인할 수 있었다.

3. 실험 방법

3.1 기호음료의 전기저항 측정

기호음료의 저항은 Figure 1과 같은 실험회로를 구성하여 각 시료에 AC 24 V를 인가한 후 전극간의 간격은 1~5 mm로, 전극의 너비는 5, 10, 15 mm로 변화시키면서 전류를 측정하여 구하였다. 회로는 실제 PCB의 회로와 유사한 형태로 제작하기 에폭시 유리(두께: 0.5 mm) 위에 구리 테이프를 부착하여 회로를 제작하였다. 구리 테이프의 접착제에 의한 열적 영향은 고려하지 못하였다.

3.2 기호음료의 절연파괴 시험

기호음료의 절연파괴 특성을 분석하기 위해 각 식품 유형별로 가장 높은 전도도와 가장 낮은 전도도를 갖는 두 가지를 선정하여 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 회로는 Figure 2와 같다. 220 V를 인가하여 각 음료의 유형 별

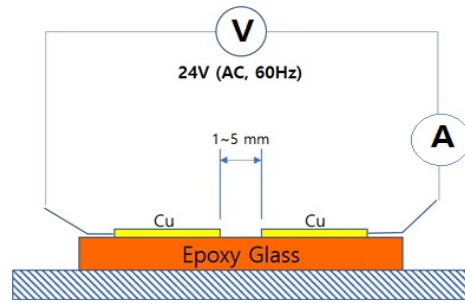


Figure 1. Circuit for resistance measurement.

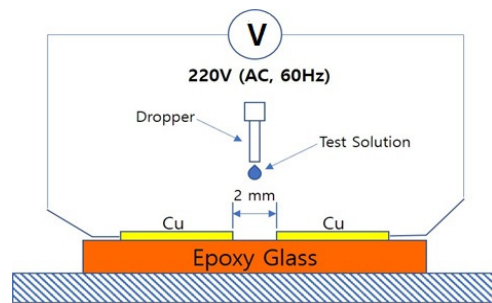


Figure 2. Circuit for dielectric breakdown of beverage.

절연파괴를 시험하였다. 극판의 간격은 IPC-2221의 규정에 따라 220 V에서 적용되는 PCB 패턴 간격인 2 mm를 적용하였고⁽⁸⁻¹⁰⁾, 피펫을 이용하여 전압 220 V가 인가된 상태에서 매 30 s 마다 전극 사이 용액이 도전로의 역할을 할 수 있도록 0.1 ml의 용액을 투입하며 실험하였으며, 최대 20번까지 반복 실험을 함으로써 절연파괴의 유무를 확인하였다. 또한, 기호음료의 절연파괴로 인한 가연물의 탄화 정도를 확인하기 위해 에폭시 유리를 종이, Medium Density Fiberboard (MDF), 스티로폼 등의 재료로 바꾸어 용액의 절연파괴 시 관찰되는 탄화 정도를 분석하였다.

3.3 전자기기 내부 화재 재현 실험

전자기기 내에서 화재 발생 원인을 파악하기 위해 실제 PCB에 사용되는 저항, 인덕터, 커패시터⁽⁸⁾ 등의 부하와 IC 소자(Diode, Transistor), 전자계전기(Relay)에 대한 화재 재현 실험을 실시하였다. 실험회로는 Figure 3과 같이 에폭시 양면 만능기판(두께 : 1.6 mm)위에 구성하였다. 각 실험은 릴레이를 제외하고 소자가 기판에 결속된 상태에서, 피펫을 이용하여 매 30 s 마다 0.1 ml의 용액을 단자 사이에 투입하였고 이와 동시에 일정한 양의 전압을 증가시켜가며 절연파괴를 관찰하였다.

열화상 카메라를 이용하여 화염 발생 시 화염의 온도를 측정하였다. 릴레이의 경우 내부에 용액이 침투되어 절연파괴가 발생한다고 가정하여 절연파괴가 가능한 지점 3곳을 선정하여 음료를 투입 후 실험을 진행하였다.

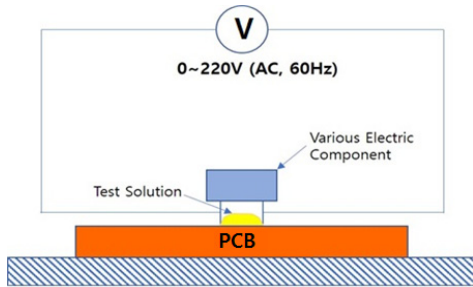


Figure 3. Simulated circuit for breakdown of element with split beverage.

4. 실험결과

4.1 전극 간 저항 측정

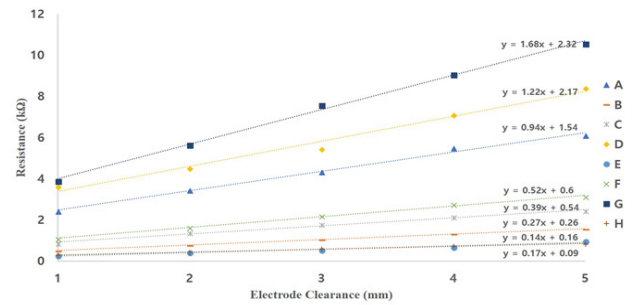
기호음료가 PCB위에 떨어졌을 때의 누전 전류의 크기 예측을 위해 전극너비를 5, 10, 15 mm, 극판간격을 1, 2, 3, 4, 5 mm로 변화시켜 가면서 전체저항 저항을 측정하였다. Figure 4는 측정 결과로 극판너비 각각 15 mm, 10 mm, 5 mm의 경우 극판 간격에 따른 저항값을 나타낸 것이다. Figure 4의 A는 Table 2의 A1~A4의 저항 측정값의 평균값이다. 이와 같이 32가지 물질의 저항을 모두 측정하였으며 측정회수는 각각 5회이다. Figure 5는 용액의 양에 따른 저항을 극판너비 15 mm에서 투입 용액의 양을 각각 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 ml로 조절하여 가며 측정한 그래프이다. 모든 그래프가 전극 간격에 반비례하고 전극 너비에 비례하는 경향을 보여주고 있으며, 일반적으로 수 kΩ의 저항값을 가지고 있음을 확인하였다.

4.2 기호음료 절연파괴 특성

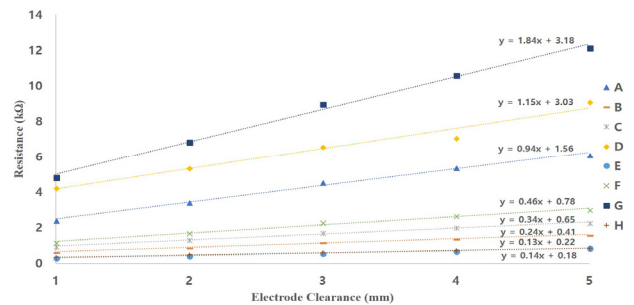
각 음료의 유형별로 전도도가 높은 것과 낮은 것 중에서 총 19종의 음료를 선택하여, Figure 6과 같은 전극 간 음료의 절연파괴의 현상을 관찰하였다. 총 19종의 시험물질 중 6종의 음료에서 절연파괴 현상을 나타내었으며 결과는 다음의 Table 3에 나타내었다. 분석결과, 시험물질 중 전도도가 가장 높은 E2와 H1의 경우 용액 투입 2회 만에 트래킹 현상이 발생하였고, 이어서 B2, A4, G1, B4 순으로 트래킹 발생을 확인하였다. 이들은 두유, 우유, 커피, 쌍화차, 소주 등으로 자주 음용되는 음료들이다. G1과 A4는 상대적으로 전도도가 낮은 편이다. 알코올음료인 G1은 절연파괴는 낮은 발화점이 원인으로 사료된다. E2의 트래킹 발생과정은 Figure 6과 같다. 관찰결과, 이들의 공통적인 특징은 통전시 발생하는 열에 의해 증발이 빠르며 지속적인 기화 현상에 의해 도전로가 개방되는 과정에서 전극의 끝부분에 지속적인 미소방전 현상이 일어난다.

4.3 가연물의 탄화 현상

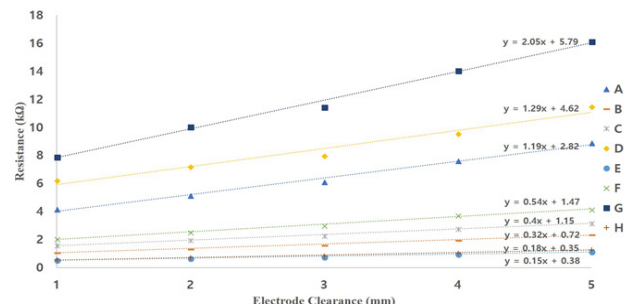
전기기계·기구의 사용은 장소를 불문하고 빈번하므로 가연물에 음료의 누출을 가정하여 종이, MDF, 스티로폼 등



(a) Electrode width: 15 mm



(b) Electrode width: 10 mm



(c) Electrode width: 5 mm

Figure 4. Resistance versus electrode clearance.

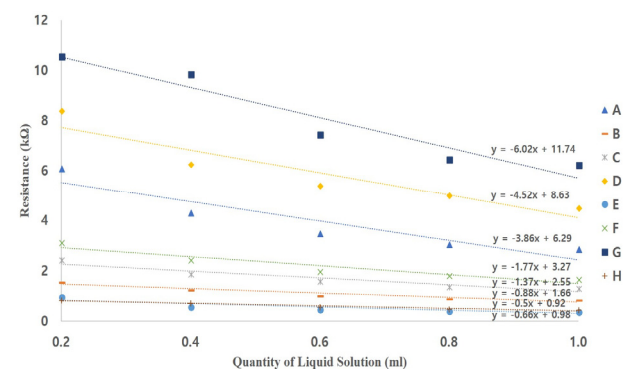


Figure 5. Resistance versus quantity of liquid solution (electrode width: 15 mm).

의 가연물 위에서 전극을 설치하고 절연파괴 실험을 실시하였다. 전도도가 높은 두 종류의 음료를 선정하여 실험을

Table 3. Dielectric Breakdown of Test Materials

Type	Number of Attempts	Tracking	Type	Number of Attempts	Tracking
A1	20	x	E4	20	x
A4	7	o	F1	20	x
B2	6	o	F5	20	x
B4	12	o	G1	7	o
C3	20	x	G2	20	x
C4	20	x	H1	2	o
D1	20	x	*		
D2	20	x	I1	20	x
E2	2	o	I2	20	x

*I1 : Bacchus F (Dong-a Pharm.), I2 : Korean Red Ginseng Drink (KGC)

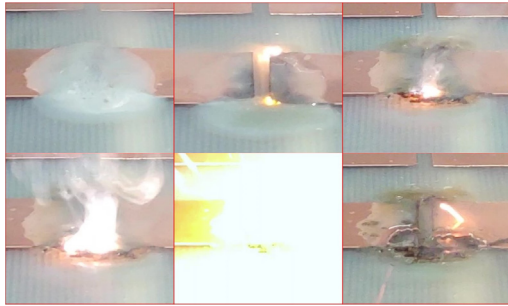


Figure 6. Tracking of test material (E2).

	Paper	MDF	Styrofoam
E2			
B2			

Figure 7. Carbonization degree of combustible materials.

진행하였으며 실험결과는 다음의 Figure 7과 같다. 결과는 두 음료 모두 착화 가능한 온도 이상으로 열화하며 지속적인 방전을 발생하지만, 기화열로 인하여 가연물을 착화하지 못했다. 종이나 MDF의 경우 액체상태의 물질이 스며들어 습윤상태이므로 착화가 어려웠고, 스티로폼의 경우 대부분이 공기로 이루어져 표면에서 발생하는 발열에 의해 일부분이 탄화되어도 내부 공기가 방출되면서 탄화 도전로가 단절되어 에너지 공급이 차단되어 착화되지 못하였다.

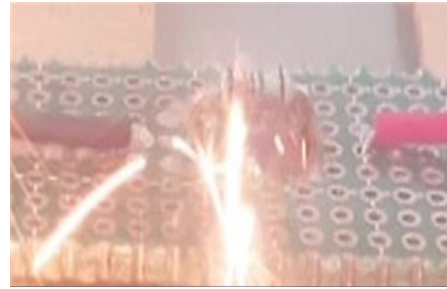


Figure 8. Dielectric breakdown of 10 MΩ resistance with split beverage.

4.4 전자기기 내부 화재 재현 실험

전자기기 내부의 PCB 등에서 화재 발생 가능성을 알아보고자 전도성이 가장 높은 E2를 0.1 ml 씩 단자 사이에 매 30 s마다 투입하며 전압도 30 s마다 일정 전압씩 증가시켜가며 소자의 단자 사이에서의 절연파괴를 관찰하였다. 음료유출에 의하여 누전이나 절연파괴로 가장 위험한 전압은 상용 220 V로 간주하여 교류를 실험 인가전압으로 사용하였다. 그러나, 커패시터와 트랜지스터의 경우 직류에서 사용되는 소자이므로 추가실험을 고려할 필요가 있다.

4.4.1 저항

본 실험에서는 PCB에 결합된 저항 소자의 단자간에 전도성이 높은 용액이 유입되었다고 가정하여 10 Ω과 10 MΩ 두 종류의 저항 소자를 사용하여 실험을 진행하였다. 인가전압은 매 30 s마다 0 V에서 10 Ω 저항의 경우 1 V, 10 MΩ 저항의 경우 5 V씩 증가시켜가며 소자를 관찰 하였다. 저항의 정격은 10 Ω, 10 MΩ 모두 탄소피막 저항기이고 각각 1/2 W, 5%와 1/4 W, 1%를 사용하였다.

분석결과, 10 Ω 저항의 경우 6 V에서 물질이 끊어오르기 시작했으며 이내 저항의 결면이 탄화되어 회로소자가 차단되었으며 방전 불꽃은 관찰되지 않았다. 10 MΩ 저항의 경우 120 V에서 물질이 끊어오르기 시작했으며, 150 V에서 용액이 탄화되면서 단락회로를 만들어 불꽃방전을 일으켰으며, 170 V에서 용액과 저항 모두 탄화되어 회로가 차단되었다. 불꽃방전 발생 시 소자 온도는 최대 80.6 °C를 기록하였다. 저항값이 큰 것일수록 사용 전압이 높아짐에 따라, 용액이 쉽게 단락 회로를 형성하고 불꽃방전을 일으키는 것으로 사료된다. 이 경우 단락 회로는 용액이 증발된 후 탄화에 의한 도전로 형성에 기인한다. 반면, 용액의 유출이 없을 경우에는 두 경우 모두 저항이 파손되어 전류가 흐르지 않게 된다. 10 MΩ의 절연파괴 발생과정은 다음의 Figure 8과 같다.

4.4.2 인덕터

본 실험에서는 인덕터 소자도 전도성이 높은 용액이 유출되었을 때를 가정하여 13 mm, 3 A의 150 μH의 인덕터를 사용하여 실험을 진행하였다. 전원은 전압조정기를 사용하여 매 30 s마다 동시에 0 V에서 0.5 V 씩 승압과 용액의 투

입을 수행하며 인덕터 소자의 변화를 관찰 및 분석하였다. 실험결과, 3.5 V의 전압을 인가하였을 때 용액이 발열 및 증발하였으며 이와 동시에 인덕터의 코일 절면이 붉게 열화되고 절연이 파괴되며 연기가 발생하는 것을 확인하였다. 인덕터는 저항성분이 작아 낮은 전압에서도 과전류가 흐르게 되어 실험을 계속할 수 없었다.

4.4.3 커패시터

실험에서는 폭발의 위험이 있는 전해 커패시터를 사용하였으며 실험조건은 저항 소자와 동일한 조건으로 실시하였다. 단지 소자의 특성상 전원의 전압을 AC와 DC로 사용하여 실험하였다. 전해 커패시터의 내부는 전해지와 전해액으로 구성되어 있고, 내부 전해액은 누출될 경우 도전로를 형성하여 트래킹 발생 위험이 있다⁽¹¹⁾. 또한, 전해 커패시터는 과전압하에서의 폭발위험에 대비해 상부에 대부분 안전변이 설치되어 있다. 이에 따라 본 실험에서는 안전변이 설치되어 있는 것과 설치되어 있지 않은 두 종류의 커패시터를 사용하였으며 이들의 제원은 Table 4와 같다. 실험결과, 안전변이 설치되어 있는 A 커패시터의 경우 AC 12 V 전압이 인가되었을 때 용액이 발열되어 커패시터 내부 압력증가로 안전변이 개방되어 폭발하였으며, 안전변이 설치되어 있지 않은 B 커패시터의 경우 AC 20 V 인가 시 용액의 발열로 인한 내부압력 증가로 전체 커패시터가 폭발하였다. 두 경우 모두 줄열에 의한 발열로 커패시터를 한계온도 이상으로 가열시켜 내부압력 증가로 인한 폭발로 판단된다. 또한, 두 경우 모두 증기가 관찰되었고 불꽃은 관찰할 수 없었으므로 단락이나 절연파괴를 원인으로 보기는 어렵다고 사료된다. 두 커패시터의 폭발은 다음의 Figure 9와 같다. 추가적으로 커패시터 내부에 있는 전해액의 누출로 인해 절연파괴가 발생하는 경우의 영향을 알아보기 위해 전해액을 일부 추출하여 절연파괴 시험을 진행하였다. 시험조건은 앞서 설명한 절연파괴 시험과 같이 AC 220 V인가 후, 극 간격을 각각 2 mm와 5 mm에서 실험을 진행하였다. 전해액의 절연파괴 발생 시 탄화 형태는 다음의 Figure 10에 나타내었다. 극판 간격 2 mm의 경우 전압인가와 동시에 폭발적인 불꽃방전을 일으켰으며, 극판 간격 5 mm의 경우 불꽃방전은 보이지는 않았지만 그림 Figure 10과 같이 극판 사이에 뚜렷한 도전로를 형성하며 아크가 발생하는 것을 확인하였다.

4.4.4 다이오드

본 실험에서 사용된 다이오드는 고휘도 발광 다이오드를 사용하였으며 전압을 1 V씩 승압하면서 실험을 진행하였다. 실험결과, 6 V 인가 시 다이오드 내부 전극이 탄화되어 회로가 차단된 것을 확인하였다.

4.4.5 트랜지스터

본 실험에서 사용된 트랜지스터는 K 170 (Field Effect

Table 4. Specifications of Electrolytic Capacitors

Type	A	B
Capacitance	1000 μ F	47 μ F
Rated Voltage	16 V	25 V
Temperature Max	105 $^{\circ}$ C	85 $^{\circ}$ C
Size	10*21 mm	5*11 mm
Safety Side	O	X

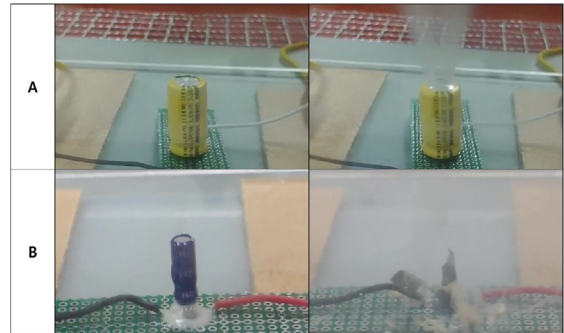


Figure 9. Explosions of electrolytic capacitors.

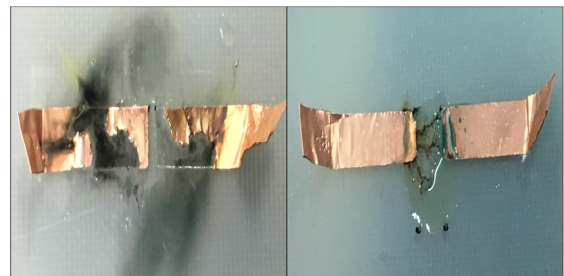


Figure 10. Dielectric breakdowns of electrolyte of condenser.

Transistor, Toshiba)을 사용하였다. 실험결과, 트랜지스터는 90 V에 도달하였을 때 음료가 탄화되어 도전로가 형성되었으며 지속적으로 불꽃방전이 발생하는 것을 확인하였고 트랜지스터 일부가 탄화되었으나 트랜지스터는 정상상태로 나타났다. 반면, 정상상태의 트랜지스터의 똑같은 과전압을 인가하였을 경우에는 회로가 차단되어 더 이상의 도통은 이루어지지 않았다. 이는 트랜지스터와 접촉한 음료가 도전로의 역할을 수행하므로 대부분의 전류가 용액으로 흐르면서 방전이 발생한 것으로 사료된다.

4.4.6 전자계전기

전자계전기의 회로 구성과 내부 절연파괴 예상지점은 Figure 11에 나타내었다. 사용된 전자계전기는 대일 DMR-202로 정격은 220 V, 6 A, Coil Resistance 13,920 Ω , 최대허용전압 110%이다. 파괴 가능성 예상지점에 음료가 침투한 상황을 가정해, 3곳의 지점에 음료를 투입후 30 s 동안 연속적으로 릴레이를 동작시켜 음료수에 의한 전극간의 절연

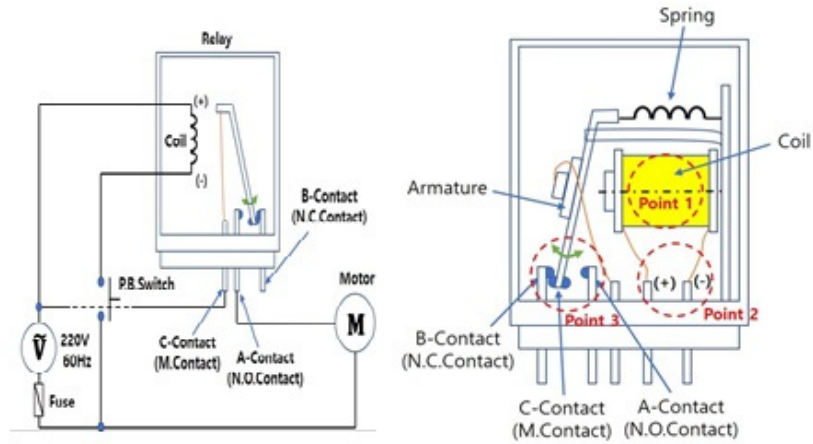


Figure 11. Relay test circuit and predicted breakdown points.

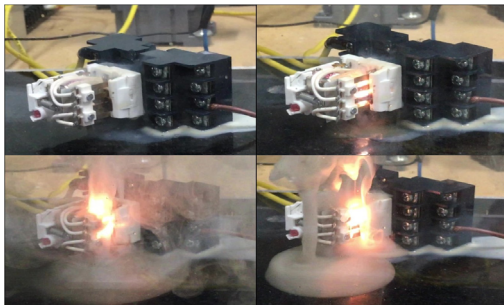


Figure 12. Ignition of test relay at contact point.

시 도전로가 형성되어 지속적인 방전 불꽃 발생과 함께 단락되는 현상을 확인하였다. 접점이 개폐되는 3 지점(B-Contact)에서는 접점 부분으로 음료 투입 후 릴레이 접점을 작동시키면 바로 방전불꽃이 시작하였으며 Figure 12와 같이 지속적인 접점 동작과 함께 화염이 발생하고 단락에 의한 폭발로 이어졌다. 이 부분은 모터 부하의 L성분에 의하여 접점의 개폐시 가장 불꽃이 많이 발생하는 곳으로, 기존의 문헌에서도 과도한 동작으로 탄화된 접점의 보고는 많았지만 이처럼 릴레이 접점 부분에 음료가 유입될 경우 화염을 관찰한 것은 처음이다.

과파 현상을 관찰분석하였다. 실험결과, 우선 코일이 존재하는 1 지점(Coil)에 물질 투입 후 실험을 진행하였지만 절연파괴는 일어나지 않았다. 이는 코일 부분의 절연을 PVC 재질로 만들어서 코일 내에 음료의 유입이 어려운 것으로 판단된다. 다음으로 220 V의 전압이 인가되는 2 지점(+전극과 -전극 사이)에 물질 투입 후 실험을 진행한 결과, 즉

4.4.7 소자들의 절연파괴 현상 요약

각 소자 마다의 전압이 인가된 단자, 전압 상승분, 음료가 없을 경우의 절연파괴전압 및 음료가 있을 경우의 절연파괴 전압, 열화상 카메라의 온도, 불꽃 방전의 여부 등을 Table 5에 정리하였다.

Table 5. Summary of Insulation Breakdown of Circuit Elements by Inflow of Beverage

		Current Carrying Path	Voltage Increase Amount [V]	Breakdown AC Voltage without Beverage [V]	Breakdown AC Voltage with Beverage [V]	Temp [°C]	Spark Discharge [O/X]
R	10 Ω	Terminals	1	10	6	79.3	O
	10 MΩ	Terminals	5	150	150	80.6	O
L	150 μH	Terminals	0.5	-	3.5	*	X
C	47 μF	Terminals	5	28	20	59.2	X
	1000 μF	Terminals	5	16	12	57.3	X
IC	Di	Terminals	1	6	6*	*	X
	Tr	Drain-Source	5	40	90	77.9	O
Relay		Coil		220		*	X
		Load			O		
		A-B Contact			139	O	

5. 결 론

본 논문은 기호음료의 저항 및 절연 특성을 파악하기 위해 식품 유형별로 분류하여 여러 가지 실험을 수행하였다. 또한, 전자회로 내에 사용되는 회로 소자들에 대한 화재 재현 실험을 통해 화재 발생의 원인을 추정하고자 연구를 진행하였으며, 아래와 같은 결론을 얻었다.

첫째, 각종 기호음료는 식품 유형이 같더라도 각각의 용액은 온도, pH, 성분 등의 영향으로 전도도 값이 각기 다르게 나타난다. Table 2의 D그룹의 경우 전도도가 최대 약 6.4배 까지 차이가 남을 확인 할 수 있다. 용액의 전기전도도는 Table 2와 같이 총 용존 고형물질의 농도와 비례관계에 있음을 확인하였다.

둘째, 용액의 저항을 측정하기 위하여 회로 내 배선 간격, 크기, 누출된 용액의 양에 따라 저항의 변화 분석하였고, 이를 통해 회로 내 기호음료의 유출로 인한 저항값을 예측할 수 있다. 저항은 전극의 길에 비례 전극의 너비에 반비례하는 일반적 경향이 그대로 적용되며 전체적으로 수 kΩ의 크기를 갖는 것으로 확인되었다.

셋째, 모든 기호음료가 절연파괴의 원인이 되지는 않는다. 절연파괴는 주로 용액의 전도도 값이 큰 것에서 발생하였으나 전도도 값이 낮은 것에서도 절연파괴 현상이 관찰되었다. 이를 통해 물질의 전도성에 상관없이 절연파괴의 잠재적인 위험이 있음을 확인할 수 있었다.

넷째, 기호음료의 절연파괴 현상은 공통적으로 줄열에 의한 증발이 빠르며 점성이 낮아 소량의 퇴적물을 남기는 것에서 발생하는 것으로 관찰되었다. 소량의 음료 유출로 인한 절연파괴는 용액이 기화됨으로 줄열을 흡수하여 탄화 및 불꽃방전을 어렵게 만드는 요인이 되어 화재 전이가 어려울 것으로 사료된다. 하지만, 지속적인 용액의 공급은 퇴적물을 남기고 도전로를 형성한다.

다섯째, 전자기기 내부 각 소자에 대한 화재 재현 실험을 통해 액체가 전자회로 내에 유입될 경우 다이오드를 제외한 모든 소자에 대해 용액의 발열과 스파크가 발생하는 것을 새롭게 확인하였다. 이 중 커패시터의 경우 용액의 투입으로 가열되고 쉽게 폭발될 수 있으며, 이에 따라 전해액 누출에 의한 2차 절연파괴를 일으킬 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 릴레이의 경우 내부로 용액이 유입되면 전원 부하측과 접점부의 가속 열화로 인해 화염을 수반한 폭발적인 반응을 보이는 것이 관찰되었다.

여섯째, 음료의 유출은 회로 내에서 회로 간에 혹은 소자 간에 도전로를 생성하여 스파크를 발생시킴으로 화재의

원인 될 수 있으며, 릴레이의 내부에 음료가 침투되면 불꽃이 발생하고 화염으로 이어지는 현상이 관찰되어 화재의 원인이 될 가능성이 있음을 확인하였다.

References

1. Korea Electrical Safety Corporation, "2016 Statistical Analysis of Electrical Disaster" (2017).
2. National Fire Agency, "National Fire Data System" (2016).
3. S. M. Park and S. K. Kim, "Study on the Risk Analysis of Complex Electric Fire by the Partial Disconnection and Tracking", Fire Science & Engineering, Vol. 31, No. 4, pp. 111-118 (2017).
4. J. H. Lee, D. H. Kim and S. C. Kim, "Improvement and Analysis for an Electric Fire Cause Classification", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 23, No. 1, pp. 36-40 (2009).
5. C. H. Jung, "A Study on fire Hazard of Heating Cabinet", Journal of Fire Investigation Society of Korea, Vol. 4, No. 2, pp. 46-60 (2013).
6. S. Y. Kim, "Case on the cause of fire by conductivity of liquid in electric", Proceedings of the Korea Institute of Fire Science and Engineering Conference. pp. 385-388 (2012).
7. Ministry of Food and Drug Safety, "Framework Act on Food Safety" (2016).
8. N. R. G. Walton, "Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids-What is Their Precise Relationship?", Desalination, Vol. 72, Issue 3, pp. 275-292 (1989).
9. IPC, "IPC-2221, Generic Standard on Printed Board Design" (2012).
10. Y. J. Yu, B. Y. Lee, C. H. Park, S. T. Park and S. H. Hong, "A Study on the Fire Hazard Controlled by Isolation Distance of Printed Circuit Board", Journal of Fire Investigation Society of Korea, pp. 252-258 (2005).
11. W. S. Park, "Development of Fire Origin Investigation Caused by Defect of an Electronic PCB", National Institute of Scientific Investigation (2012).
12. J. Y. Park, J. H. Kim, K. M. Park and S. B. Bang, "Cause Analysis and Countermeasure of Tracking in Mobile Phone Charger", Journal of Fire Investigation Society of Korea, Vol. 30, No. 6, pp. 71-77 (2016).