

통전전류 특성을 이용한 모터 기동용 전해 커패시터 폭발 방지 방법

The Explosion Prevention Method for Electrolytic Motor Start Capacitors using Current Characteristic

김재현[†] · 박진영* · 박광목* · 방선배* · 김용운**

(Jae-Hyun Kim · Jin-Young Park · Kwang-Muk Park · Sun-Bae Bang · Yong-Un Kim)

Abstract - In this paper, we investigated fire cases those are believed to be caused by explosion of a electrolytic motor start capacitor. Using two types of commercially available electrolytic motor start capacitors, capacitor current and the possibility of capacitor explosion were tested. And the ignition possibility of the internal material leaked from a capacitor was also tested. In addition, experiments were conducted to see if the fire could spread when a capacitor was exposed to an external flame. From our test we observed that the current of the electrolytic motor start capacitor rose continuously to a certain level by product, if the capacitor was continuously energized with working voltage, and then the capacitor was exploded. The gas and liquid leaked from the capacitor by the explosion could ignite by an electric arc and an external flame. The capacitor current at explosion was different product by product, but each product had a certain current level at explosion. And the increase rate of the capacitor current until explosion was 24% and 31% for the products used in the experiment. We proposed the capacitor explosion prevention method that cuts off power when the capacitor current rises to a certain threshold level. The proposed method can be used if the current of the applied electrolytic motor start capacitor rises continuously and then the capacitor is exploded at a certain current level when the capacitor is energized continuously.

Key Words : Electrolytic motor start capacitor, Capacitor explosion, Capacitor current, Explosion prevention

1. 서 론

전기·전자기술의 혁신적인 발달로 인류의 생활환경이 눈부시도록 개선되었다. 전기에너지를 이용하는 주방, 생활, 계절, 영상 등의 가전제품 및 여러 IT기기 등이 광범위하게 보급되어 전기에너지가 없는 현대생활을 상상하기 어려우며, 이에 따라 화재사고의 양상도 크게 변화하였다.

2015년 우리나라에서 발생한 총 화재는 44,435건이며 그 중 전기화재는 8,980건으로 전기화재 점유율은 20.2%이다. 52.9%를 차지하는 부주의에 의한 화재 다음으로 높은 점유율을 차지하고 있다[1]. 따라서 부주의에 의한 화재와 함께 전기화재를 감소시킬 수 있는 정책과 기술개발이 매우 중요하다. 이를 위해서는 전기화재 발생 원인과 발화 매커니즘에 대한 조사와 연구가 선행되어야 하며, 이를 통하여 합리적이고 효과적인 예방대책과 관련 기술 개발이 가능하다.

본 논문에서는 업소용 냉동고 압축기 모터 회로의 기동 커패시터 주위에서 최초 발화한 것으로 추정되는 화재사례를 조사하고, 화재 현장의 기동 커패시터와 유사한 커패시터를 이용한 실험

험을 통하여 모터 기동용 전해 커패시터의 통전전류, 발열, 폭발 등의 특성을 확인한 후 그 결과를 바탕으로 폭발 방지 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 모터 기동용 전해 커패시터 폭발에 의한 화재사례

그림 1은 2015년 1월 전주 덕진구 소재 건물 1층 음식점에서 발생한 화재 현장 사진이다. 업소용 냉동고 하부를 중심으로 연소패턴이 확인되었고, 냉동고 하부 내부에서 압축기 모터 기동용



그림 1 화재 사례 1의 사진[2]

Fig. 1 Photos of fire case 1[2]

[†] Corresponding Author : KESCO ESRI.

E-mail: azalea@kesco.or.kr

* KESCO ESRI.

** Namwon fire station.

Received : December 8, 2016; Accepted : October 30, 2017

전해 커패시터가 폭발된 채로 발견되었다. 따라서 기동 커패시터 폭발이 화재 원인과 관련이 있거나, 혹은 화재를 가속화시킨 것으로 추정되었다[2].

그림 2는 2013년 8월 전주 덕진구 소재 건물 1층 상가에서 발생한 화재 현장 사진과 CCTV 영상 사진이다. 업소용 냉동고 하부에서 연소 패턴이 확인되었고, CCTV 영상에서는 냉장고 하단 내부에서 폭발과 동시에 화염이 발생하면서 화재가 확산된 것을 확인할 수 있었다. 폭발과 함께 화재가 확산된 점으로 냉장고 압축기 모터 기동용 전해 커패시터 폭발에 의한 화재로 추정되었다[2].



그림 2 화재 사례 2의 사진[2]
Fig. 2 Photos of fire case 2[2]

2.2 모터 기동용 커패시터 사용목적 및 전해 커패시터 모델링

커패시터는 전하의 축적 및 방전을 통하여 전기에너지를 저장하고 방출할 수 있는 소자이며, 전기 및 전자회로에 주로 사용되어 회로간의 결합, 바이패스, 필터, 공진회로, 상용전원의 역률개선 등에 사용된다[3]. 또한 단상 유도 모터의 보조권선에 직렬로 연결되어 모터의 기동 및 구동을 위한 위상각과 토크를 발생시키는 용도로도 사용된다[4].

0.5 마력 단상 유도 모터에 필요한 기동 커패시터 용량은 약 300 μF 이며, 구동 커패시터는 20~50 μF 용량의 것을 일반적으로 사용한다. 기동 커패시터는 모터가 기동될 때 잠시만 작용하고 모터가 회전하는 구동 기간에는 원심력 스위치에 의해 회로에서 분리되므로 저가의 전해 커패시터를 주로 사용하며, 구동 커패시터는 지속적으로 전원이 인가되므로 교류 유지형 커패시터를 사용한다[4].

그림 3은 모터 기동용 전해 커패시터의 일반적인 구조이다[2]. 내부는 접속 단자와 연결된 한 쌍의 금속 판 사이에 유전체 막이 삽입되어 롤 형태로 감겨진 구조이고, 외부 케이스는 원통 형태의 알루미늄과 플라스틱 이중 구조로 이루어지는 경우가 많다.

커패시터의 특성 분석을 위한 등가회로 모델은 여러 형태로 제안되어져 있다. 그림 4는 학계와 산업계에서 널리 사용하는 전해 커패시터 등가회로 모델 중 하나이다[5-7]. 이 모델은 커패시터에 인가되는 전원 주파수가 충분히 낮아 ESL(직렬등가인덕턴스)를 무시할 수 있을 때 적용가능하다. 우리나라 상용전원 주파수가 60 Hz이므로 상용전원이 인가되는 경우에 적합한 등가회로 모델 중 하나이다. 이 등가모델에서 커패시터 임피던스 Z_{CAP} 은

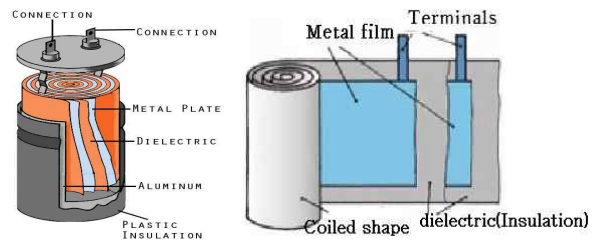
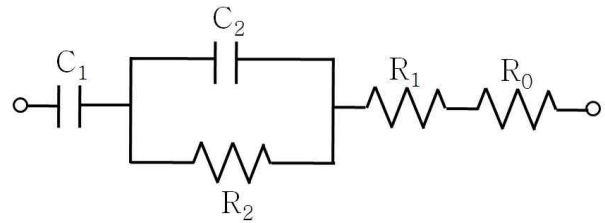


그림 3 모터 기동용 전해 커패시터의 일반적인 구조[2]
Fig. 3 The general structure of the electrolytic motor start capacitor[2]



R_0 : 터미널, 탭, 포일 저항
 R_1 : 전해물질 저항
 R_2 : 유전손실 저항
 C_1 : 터미널 정전용량
 C_2 : 유전손실 정전용량

그림 4 전해 커패시터의 대표 등가 모델
Fig. 4 Classical equivalent model for electrolytic capacitor

수식 (1)과 같고, 수식 (1)의 실수부는 ESR(등가직렬저항)으로 수식 (2)와 같다.

$$Z_{CAP} = \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2} + R_1(T) + R_0 \quad (1)$$

$$ESR = \frac{R_2}{1 + (\omega C_2 R_2)^2} + R_1(T) + R_0 \quad (2)$$

수식 (1)과 수식 (2)에서 ω 는 커패시터 인가전원의 각주파수, C_1 은 터미널 정전용량, C_2 는 유전손실 정전용량, R_0 은 내부 금속 전극판과 탭 및 터미널의 합성 저항, R_1 은 전해물질의 저항, R_2 는 유전손실 저항, T 는 커패시터 내부 전해물질의 온도이다. 수식 (2)와 같이 ESR은 전원 주파수가 높아지면 낮아진다. 유전물질로 사용되는 전해물질의 저항 R_1 은 수식 (3)과 같이 전해물질의 온도에 따라 변한다.

$$R_1(T) = R_{1T} \exp\left(\frac{T_{base} - T_{core}}{E_c}\right) \quad (3)$$

수식 (3)에서 E_c 는 온도계수, T_{base} 는 R_1 혹은 ESR을 측정할 때의 온도, R_{1T} 는 T_{base} 온도에서 측정한 R_1 값, T_{core} 는 R_1 혹은 ESR을 계산(추정)하고자 할 때의 전해물질 온도이다. 수식 (3)과 같이 R_1 값은 전해물질의 온도가 상승하면 낮아지고 따라서 ESR도 같이 낮아진다. 이와 같이 ESR은 전해물질의 온도뿐만 아니라 인가되는 전원 주파수에 따라 변하며, 전원의 각주파수 ω 가 매우 높아지면 수식 (4)와 같이 근사화되어 온도에만 의존하게

된다. 우리나라 상용전원의 주파수는 60 Hz이므로 기동용 전해 콘덴서의 ESR은 수식 (2)와 같이 해석할 수 있다.

$$ESR = R_1(T) + R_0 \quad (4)$$

ESR이 존재하지 않는 이상적인 커패시터는 에너지를 소비하지 않기 때문에 발열하지 않지만, 실제 커패시터는 ESR이 존재하기 때문에 수식 (5)와 같이 소비전력이 발생한다.

$$P_{dissipated} = ESR \times I_c^2 \quad (5)$$

수식 (5)에서 $P_{dissipated}$ 는 ESR에 의한 소비전력, I_c 는 커패시터 통전전류이다. ESR에 의한 발열에 의해 내부 전해물질 온도가 상승하면 수식 (2)와 수식 (3)과 같이 ESR이 감소하게 되고 이에 따라 기동용 전해 커패시터 통전전류는 상승할 수 있음을 알 수 있다. 즉 그림 4의 모델에서 커패시터가 발열하면 통전전류 변화가 발생할 수 있음을 알 수 있다.

2.3 전기 기기용 커패시터 및 모터 기동용 전해 커패시터 관련 표준

KS C 4805 표준의 전기 기기용 커패시터 연속 내용성 시험에서는 40,000, 25,000, 10,000, 2,000 시간의 네 가지 커패시터 통전 시간으로 전기 기기용 커패시터를 구분하고 있고, 이에 따른 연속 내용성 시험 시간은 각각 800, 500, 200, 40 시간으로 규정하고 있다. 커패시터 통전 시간이란 합리적인 설계를 위한 설계상 목표 통전 시간이다[8]. 따라서 KS C 4805 표준에 부합하는 전기 기기용 커패시터는 규정된 동작전압이 인가되면 설계상 목표 통전시간 동안에는 폭발 등의 고장이 발생하지 않고 정상적으로 동작하는 것이 일반적이다.

KS C IEC 60252-2 표준의 모터 기동용 전해 커패시터 단자간 전압 시험에서는 정격 교류 전압의 1.2배를 인가하여 10 초(형식 시험) 혹은 2 초(정기 시험) 동안 시험하는 것으로 규정되어 있다. 그리고 정격 조건에서의 동작 적합성 확인을 위한 내절도 시험에서는 정격전압의 1.1배를 인가하여 커패시터 부하주기의 사용률로 500시간 시험 하는 것으로 규정되어 있다. 부하주기에란 커패시터에 반복적으로 시험전압이 인가되고 차단되는 시간주기이며, 반복적으로 1초 동안 시험전압이 인가되고 59초 동안 시험전압이 차단되는 경우의 부하주기는 60초이다. 시험전압은 연속적으로 최대 10초까지 인가 할 수 있다. 내절도 시험에서 모터 기동용 전해 커패시터는 영구 파괴나 중단, 섬락이 발생하지 않아야 한다[9]. 따라서 KS C IEC 60252-2 표준에 부합하는 모터 기동용 전해 커패시터는 정격전압의 1.1배가 지속적으로 인가될 때 10 초 동안 고장(폭발을 포함한)이 없어야 하며, 그 이후의 동작 적합성 및 폭발 여부는 커패시터 제품마다 다르다.

모터 기동용 전해 커패시터는 모터 기동시의 짧은 시간동안만 통전되기 때문에 정상적인 사용조건에서는 폭발 등의 고장이 발생할 가능성이 거의 없지만, 이상 원인에 의해 부하주기보다 짧은 주기로 모터가 반복 기동되거나 지속적으로 전원이 인가되는



그림 5 커패시터 샘플 A의 외형 및 내부 구조[2]

Fig. 5 The shape and internal structure of capacitor sample A[2]



그림 6 커패시터 샘플 B의 외형 및 내부 구조[2]

Fig. 6 The shape and internal structure of capacitor sample B[2]

표 1 커패시터 샘플 A, B의 규격

Table 1 Specification of Capacitor Samples A & B

구분 \ 규격	Capacitor Sample A	Capacitor Sample B
정전용량 [μF]	145 ~175	200
최대 입력전압 [V]	300	220
케이스 높이 [mm]	110	74
케이스 직경 [mm]	45	34

경우에는 제품에 따라 폭발할 가능성을 완전히 배제할 수 없다.

2.4 지속적 동작전압 인가에 따른 모터 기동용 전해 커패시터 발열, 통전전류, 폭발 특성 확인 실험

모터 기동용으로 사용되는 전해 커패시터에 동작전압이 지속적으로 인가되는 경우의 발열 및 통전전류 특성을 실험적으로 확인하기 위하여 인터넷 전자상거래 사이트 등에서 판매되고 있는 모터 기동용 전해 커패시터 2종을 무작위로 구입하여 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 커패시터 샘플은 그림 5와 그림 6과 같다. 표 1과 같이 그림 5의 커패시터 샘플 A는 정전용량이 145~175 μF 이며 300 VAC까지의 전원을 인가할 수 있는 것으로 명기되어 있고, 크기는 높이 110 mm, 직경은 45 mm이다. 그림 6의 커패시터 샘플 B는 정전용량이 200 μF 이며 220 VAC까지의 전원을 인가할 수 있는 것으로 명기되어 있고, 크기는 높이 74 mm, 직경은 34 mm이다.

커패시터 샘플 A 5개와 커패시터 샘플 B 5개에 그림 7, 8과 같이 상용전원(220 VAC, 60 Hz)을 지속적으로 인가하여 커패시터 표면온도, 통전전류, 폭발 유무를 확인하였다. 온도 측정은

Graphtec GL-220 Data Logger를 사용하였고, 통전전류 측정에는 HIOKI 3285-20 클램프미터를 이용하였다. 실험결과 커패시터 표면온도와 통전전류는 서서히 증가하였고, 각 제품별로 일정시간이 지나면 커패시터 안전변(내부압력이 위험압력에 도달하면 내부 물질을 방출시키는 장치 혹은 부분)을 통하여 내부물질이 기체 상태로 분출되는 폭발현상이 관찰되었다. 하지만 폭발에 의한 착화현상은 확인되지 않았다.

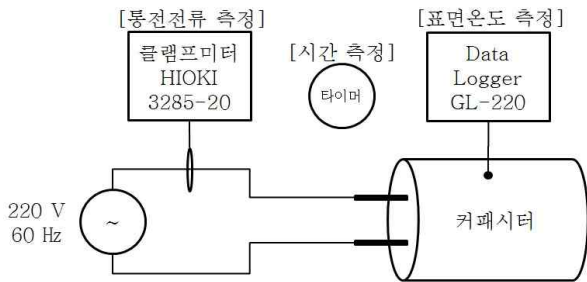


그림 7 실험도 1 - 커패시터 통전전류 및 표면온도 측정
 Fig. 7 Experiment diagram 1 - measurement of capacitor current & surface temperature

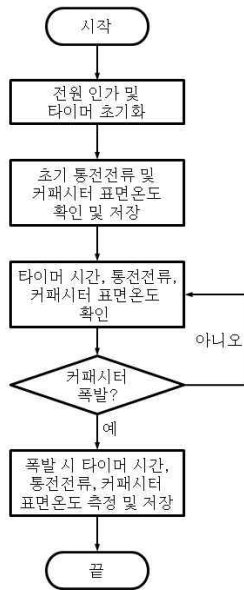


그림 8 실험 순서도 1 - 커패시터 통전전류 및 표면온도 측정
 Fig. 8 Experiment flow chart 1 - measurement of capacitor current & surface temperature

표 2와 표 3은 샘플 A와 샘플 B의 상온 조건에서의 커패시터 표면온도와 통전전류, 폭발시의 커패시터 표면온도와 통전전류 측정치를 정리한 것이다. 커패시터 샘플 A의 상온 상태 초기 전류는 평균 12.4 A였으며, 폭발시의 통전전류는 평균 15.4 A로 측정되었다. 폭발시의 커패시터 표면온도는 평균 54.2 °C였고, 폭발까지의 전압인가 시간은 224.8 초였다. 커패시터 샘플 B의 상온

상태 초기 전류는 평균 19.1 A였으며, 폭발시의 통전전류는 평균 25.0 A로 측정되었다. 폭발시의 커패시터 표면온도는 평균 125.2 °C였고, 폭발까지의 전압인가 시간은 62.2 초였다. 두 제품 다 상온에서의 통전전류보다 폭발시의 통전전류가 높았으며, 그 크기도 제품별로 상당히 일정함을 알 수 있다.

표 2 커패시터 샘플 A의 온도, 통전전류 실험 결과

Table 2 Capacitor Sample A experiments - Temperature, Current

Capacitor No.	초기 표면 온도 [°C]	초기 통전 전류 [A]	폭발시 표면 온도 [°C]	폭발시 통전 전류 [A]	통전 시간 [S]
A-1	20.4	12.4	56	15.4	232
A-2	20.2	12.2	54	15.6	209
A-3	20.5	12.3	51	15.3	186
A-4	20.3	12.3	55	15.2	241
A-5	20.2	12.7	55	15.6	256
Avg.	20.3	12.4	54.2	15.4	224.8

표 3 커패시터 샘플 B의 온도, 통전전류 실험 결과

Table 3 Capacitor Sample B experiments - Temperature, Current

Capacitor No.	초기 표면 온도 [°C]	초기 통전 전류 [A]	폭발시 표면 온도 [°C]	폭발시 통전 전류 [A]	통전 시간 [S]
B-1	20.5	18.3	96	23.8	60
B-2	20.3	19.6	128	24.8	69
B-3	20.3	19.1	135	25.5	58
B-4	20.6	20.3	131	25.6	63
B-5	20.1	18.1	136	25.1	61
Avg.	20.4	19.1	125.2	25.0	62.2

2.5 상온과 폭발 온도에서의 커패시터 ESR 및 리액턴스 분석

그림 4의 전해 커패시터 등가 모델로부터 커패시터의 리액턴스 X_{CAP} 를 구하면 식 (6)과 같다.

$$X_{CAP} = -\frac{1}{\omega C_1} - \frac{\omega C_2 R_2^2}{1 + (\omega C_2 R_2)^2} \tag{6}$$

수식 (4)에서 ω 는 커패시터 인가전원의 각주파수, C_1 은 터미널 정전용량, C_2 는 유전손실 정전용량, R_2 는 유전손실 저항이다. 그림 4의 전해 커패시터 등가 모델에서 리액턴스는 주파수에는 의존하지만 온도에는 영향을 받지 않는다. 실험에 사용된 커패시터 제품의 상온 조건 ESR과 리액턴스를 구하기 위하여 약 20 °C 상온 조건에서 그림 9, 10과 같이 60 Hz의 교류전원을 인가한 후 커패시터 양단의 전압, 전류, 위상을 오실로스코프(Lecroy 610Zi)를 이

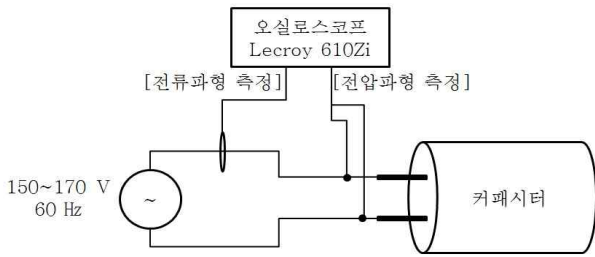


그림 9 실험도 2 - 커패시터 임피던스 측정
 Fig. 9 Experiment diagram 2 - measurement of capacitor impedance



그림 10 실험 순서도 2 - 커패시터 임피던스 측정
 Fig. 10 Experiment flow chart 2 - measurement of capacitor impedance

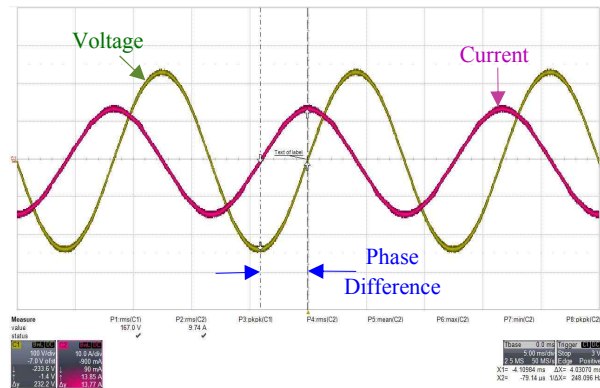


그림 11 커패시터 샘플 A-7의 전압, 전류, 위상차 측정 파형
 Fig. 11 Capacitor Sample A-7 Measurement - Voltage, Current, Phase Difference

용하여 측정하였다. 인가한 교류전원은 커패시터 폭발 방지와 발열을 고려하여 커패시터 샘플 A는 약 170 V를, 커패시터 샘플 B는 약 150 V를 인가하였다. 표 4와 표 5는 측정 결과이며, 그림

표 4 커패시터 샘플 A와 B의 전압, 통전전류, 위상차 측정 결과

Table 4 Capacitor Sample A & B Measurement - Voltage, Current, Phase Difference

Capacitor No.	인가 전압 [V]	통전 전류 [A]	위상차 [°]
A-6	170.1	9.98	87.1
A-7	167.0	9.74	87.1
B-6	150.9	12.91	85.1
B-7	151.2	12.96	85.1

표 5 커패시터 샘플 A와 B의 임피던스, ESR, 리액턴스, 전력 계산 결과

Table 5 Capacitor Sample A & B Calculation - Impedance, ESR, Reactance, Power

Capacitor No.	전체 임피던스 [Ω]	ESR [Ω]	리액턴스 [Ω]	소비전력 [W]
A-6	17.04	0.87	17.02	86.8
A-7	17.15	0.88	17.12	83.3
B-6	11.69	1.01	11.65	167.9
B-7	11.67	1.01	11.62	168.9

표 6 교류 220 V 인가 시 통전전류와 소비전력

Table 6 Capacitor Current & Power Consumption being applied with 220 VAC

Capacitor No.	통전전류 [A]	소비전력 [W]
A-6	12.91	145.0
A-7	12.83	144.9
B-6	18.82	357.7
B-7	18.85	358.9

11은 오실로스코프 측정 화면이다. 측정 결과 샘플 A, B 모두 ESR이 리액턴스에 비하여 현저히 낮은 것으로 확인되었다.

측정된 임피던스를 활용하여 220 V 상용전원이 인가될 경우의 통전전류와 소비전력을 구한 결과는 표 6과 같다. 표 6의 결과가 실제 220 V 상용전원 인가 실험 결과인 표 1과 표 2와 유사하여 임피던스, ESR, 리액턴스 측정값은 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 220 V 상용전원 인가시 소비전력은 샘플 A의 경우 약 145 W, 샘플 B의 경우 약 358 W로 계산되었다. 따라서 지속적으로 상용전원이 인가되면 발열이 심하게 발생하고 커패시터 내부 물질의 열분해 및 기화에 의해 내부 압력이 높아져 폭발하는 것으로 판단된다.

그림 4의 커패시터 모델에서는 ESR 값은 온도가 상승하면 낮아지지만, 리액턴스는 변하지 않는다. 따라서 커패시터 통전전류는 모든 온도 범위에서 인가전압을 리액턴스로 나눈 값보다는 커야 한다. 그림 4 커패시터 모델과 표 5의 커패시터 리액턴스 측

정값을 적용하면 샘플 A는 모든 온도범위에서 통전전류가 약 12.89 A(220 V ÷ 17.04 Ω) 이하이어야 하고, 샘플 B는 모든 온도 범위에서 통전전류가 약 18.90 A(220 V ÷ 11.64 Ω) 이하이어야 한다. 하지만 표 2와 표 3의 결과에서는 샘플 A는 약 15.4 A까지 상승하였으며, 샘플 B는 약 25.0 A까지 상승한 후 폭발하였다. 오실로스코프 파형에서 확인한 상온과 폭발시의 커패시터 통전전류의 위상은 거의 변화가 없었다. 따라서 표 2와 표 3의 결과를 설명할 수 있는 방법 중 하나는 온도에 따라 전해 커패시터 리액턴스가 변하는 것으로 가정하는 것이다. 즉 전해 커패시터 등가 정전용량은 온도에 따라 변한다고 모델링 하면 표 2와 표 3의 결과를 설명할 수 있다.

2.6 외부 화염에 의한 모터 기동용 전해 커패시터 폭발 실험

전해 커패시터가 전기적 발열에 의해 폭발할 수도 있지만 외부화염 등에 의해 가열될 때도 폭발할 수 있다. 외부화염에 의한 영향을 실험적으로 확인하기 위하여 모터 기동용 전해 커패시터 샘플 A와 샘플 B 제품에 가스토치를 이용하여 약 490 °C의 화염을 그림 12와 같이 인가하여 확인하였다. 샘플 A 제품은 5분 동안 화염을 인가하여도 폭발이 발생하지 않았지만, 샘플 B 제품은 약 3분 동안 화염을 인가했을 때 측면에서 폭발이 발생하면서 화염이 분출되었다. 이 때 가스토치의 화염을 제거하면 화염이 꺼지면서 기체상태의 커패시터 내부물질만 분출되었다. 실험 결과 커패시터 샘플 B 내부에서 분출되는 기체는 가연성임을 확인할 수 있었고, 화재 상황에서는 주위의 연소패턴을 변화시킬 수 있음을 확인하였다.

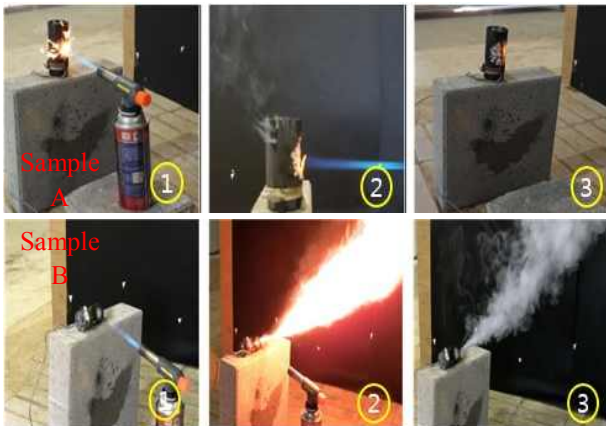


그림 12 커패시터 샘플 A와 B의 외부화염 노출 실험[2]
Fig. 12 Exposure experiment to an external flame with capacitor sample A & B[2]

2.7 모터 기동용 전해 커패시터 내부 물질 유출에 의한 착화 가능성 실험

모터 기동용 전해 커패시터에 상용전원을 지속적으로 인가하면 내부물질이 분출하면서 폭발하는 현상을 확인하였지만 바로

착화되지는 않았다. 분출된 내부물질이 전기설비와 상호작용하여 착화될 수 있는지를 확인하기 위하여 그림 13과 그림 14와 같은 실험을 실시하였다. 그림 13의 실험은 커패시터 샘플 B를 밀폐용기 속에서 상용전원을 인가하여 폭발시킨 후 커패시터 내부에서 분출되어 포집된 액체상태의 커패시터 내부물질 속에 한 쌍의 전선 전극을 넣어 상용전원을 통전시켰다. 통전 전류는 15 ~ 25 mA였으며 지속적으로 통전시 양단의 전선 전극에서 끊어서 기화되는 현상이 확인되었다. 이때의 액체 표면 온도를 열화상카메라(Fluke TI45FT)로 측정된 결과 약 111.6 °C로 측정되었다. 샘플 B의 폭발시 내부분출 물질은 액체 상태에서 약간의 도전성이 있는 것으로 확인되었다.



그림 13 커패시터 샘플 B에서 유출된 내부 물질의 통전 시험[2]
Fig. 13 Current carrying test of internal material from capacitor sample B[2]



그림 14 커패시터 샘플 B에서 유출된 내부 물질의 착화 시험[2]
Fig. 14 Ignition test of internal material from capacitor sample B[2]

그림 14의 실험은 그림 13의 액체물질을 실제 현장에서 모터 기동용 전해 커패시터가 설치되기도 하는 플라스틱 함의 전선 단자대 주위에 뿌린 후 단자대에 접속된 전선에 600 V까지 전압을 상승시킬 수 있는 슬라이더를 이용하여 전원을 인가한 실험이다. 220 V를 인가한 결과 액체물질이 끊으면서 지속적으로 아크가 발생하였다. 인가전압을 서서히 높이면 아크의 강도가 강해졌으며 인가전압이 약 340 V일 때 착화가 발생하였다. 실험결과 모터 기동용 전해 커패시터가 폭발하여 전원이 충전된 단자대에 유출되면 주위 상황과 커패시터 제품에 따라 착화될 수 있음을 확인하였다.

2.8 통전전류 및 발열 특성을 이용한 모터 기동용 전해 커패시터 폭발 방지 방법

모터 기동용 전해 커패시터는 모터 기동시에만 작용되고 모터

가 회전하기 시작하면 스위치에 의해 회로에서 분리되기 때문에 짧은 시간동안만 통전된다. 따라서 발열 특성이 우수하지 않은 저가의 커패시터를 사용하는 경우가 많지만, 정상적인 상황에서는 폭발하지는 않는다. 하지만 회로 분리를 위한 스위치가 고장난 경우, 이상 원인에 의해 잦은 모터 기동이 발생하는 경우 혹은 커패시터 자체가 열화된 경우에 발열하여 폭발할 가능성이 있다.

따라서 연속적으로 전원이 인가되더라도 폭발하지 않고 품질이 장기간 유지될 수 있는 커패시터를 기동 커패시터로 사용하는 것이 바람직하지만, 공간상의 제약으로 인하여 작은 공간에 정전용량이 큰 전해 커패시터를 사용해야 하는 경우에는 폭발방지 장치를 추가로 설치하는 것이 사고 발생 확률을 줄일 수 있다.

본 논문에서 실험한 커패시터 샘플 A의 경우 상온에서의 통전전류 대비 폭발시 통전전류의 비는 약 1.24(15.4÷12.4)이고, 제품 B의 경우는 약 1.31(25.0÷19.1)이다. 따라서 모터 기동용 전해 커패시터가 지속적으로 동작전압이 인가되는 경우 통전전류가 지속적으로 상승하고, 수 분내의 짧은 시간 안에 폭발하며, 폭발시의 통전전류가 상온에서의 통전전류보다 큰 특성을 가지는 제품인 경우에는 통전전류를 측정하는 장치를 설치하고 통전전류가 일정 수준 이상(문턱 전류)으로 증가하면 커패시터를 회로에서 분리하는 방법을 추가로 적용하여 기존의 커패시터 회로분리 방법과 함께 이중으로 보호가 가능하다. 이에 따라 사고예방에 대한 신뢰성을 높일 수 있다. 문턱 전류는 적절한 실험과 설계를 통하여 설정할 수 있고, 경우에 따라 퓨즈 등의 간단한 장치로 구현이 가능하다.

3. 결 론

본 논문에서는 모터 기동용 전해 커패시터 폭발과 관련이 있는 화재 사례를 조사하고, 시중에서 판매되고 있는 2 종류의 모터 기동용 전해 커패시터를 사용하여 지속적으로 동작전압이 인가될 때의 발열, 폭발, 통전전류 확인 실험을 실시하였다. 또한 실험에 사용한 커패시터의 임피던스, ESR, 리액턴스를 측정하고 전해 커패시터 모델을 이용하여 비교 분석을 실시하였다. 추가로 외부 화염에 의한 전해 커패시터 폭발 실험을 실시하였다. 이런 실험 결과와 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시중에서 판매되고 사용되고 있는 모터 기동용 전해 커패시터 제품 중에는 지속적으로 동작전압이 인가되는 경우 폭발할 수 있으며, 폭발시 유출되는 물질은 전기적 아크에 의해 착화되는 제품도 있다.
- (2) 실험에 사용한 모터 기동용 전해 커패시터는 온도가 상승함에 따라 ESR과 함께 리액턴스도 같이 변화하는 것으로 측정되었다.
- (3) 실험에 사용한 모터 기동용 전해 커패시터의 경우 상용전압이 지속적으로 인가되면 통전전류가 지속적으로 상승한 후 폭발하였고, 상온조건의 통전전류 대비 폭발시 통전전류 상승률은 샘플별로 각각 24%와 31%였다. 폭발시 통전전류는 제품마다 차이가 발생하였지만 제품별로 일

정한 수준으로 측정되었다. 따라서 모터에 적용한 모터 기동용 전해 커패시터가 실험에 사용한 커패시터와 같이 지속적으로 동작전압이 인가될 때 통전전류가 지속적으로 상승하여 폭발하고 폭발시의 통전전류가 상온에서의 통전전류보다 큰 특성을 가지는 제품인 경우, 통전전류를 측정하고 통전전류가 일정 수준 이상(문턱 전류)으로 증가하면 커패시터를 회로에서 분리하는 방법을 추가로 적용하여 기존의 커패시터 인가 전원 차단 방법과 함께 이중으로 보호가 가능하다.

References

- [1] J. H. Kim, K. M. Park, J. Y. Park, K. Y. Lee, S. B. Bang, H. N. Choe, B. K. Han, and H. B. Jo, "A Study on Calculation Methods of molten mark sphericity", Proceedings of KIEE Summer Annual Conference, The Korean Institute of Electrical Engineers, pp. 1549-1550 (2016).
- [2] Jeonbuk Fire Headquarter, "The 17th Jeonbuk Fire Investigation Conference", pp. 19-21 (2016).
- [3] H. K. Park, C. S. Choi, "Examination of the Cause of Damage to Capacitors for Home Appliances and Analysis of the Heat Generation Mechanism", Journal of the KOSOS, Vol. 26, No. 6, pp. 13-19(2011).
- [4] P. C. Sen, "Principles of electric machines and power electronics", John Wiley & Sons, Inc. (1997).
- [5] F. D. Kieferndorf, M. Förster and T. H. Lipo, "Reduction of DC-bus capacitor ripple current with PAM/PWM converter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 40, Issue. 2, pp. 607-614 (2004).
- [6] E. C. Aeloiza, J. H. Kim, P. Ruminot and P. N. Enjeti, "A real time method to estimate electrolytic capacitor condition in PWM adjustable speed drives and uninterruptible power supplies", 36th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 2867-2872 (2005).
- [7] H. Malek, S. Dadras and Y. Chen, "Fractional order equivalent series resistance modelling of electrolytic capacitor and fractional order failure prediction with application to predictive maintenance", IET Power Electron, Vol. 9, Iss. 8, pp. 1608-1613 (2016)
- [8] "KS C 4805 Capacitors for Electrical Apparatus", Korean Agency for Technology and Standards.
- [9] "KS C IEC 60252-2 AC Motor Capacitors - Part 2: Motor start capacitors", Korean Agency for Technology and Standards.

저 자 소 개



김 재 현 (Jae-Hyun Kim)

1973년 2월 21일생. 1999년 2월 경북대 전자전기공학부 졸업. 2001년 2월 동대학원 전자공학과 졸업(석사). 2001년~2005년 LG.Philips LCD 주임연구원. 2006년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 선임연구원.

Tel: (063) 716-2356

Fax: (063) 716-9660

e-mail: azalea@kesco.or.kr



박 진 영 (Jin-Young Park)

1982년 12월 18일생. 2007년 2월 세종대 전자정보통신공학부 졸업. 2017년 현재 전북대학교 전기공학과 석사과정. 2013년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 주임연구원.

Tel: (063) 716-2357

Fax: (063) 716-9660

e-mail: jyp82@kesco.or.kr



박 광 목 (Kwang-Muk Park)

1980년 11월 20일생. 2008년 2월 대전대 전기공학과 졸업. 2015년 9월~현재 전북대학교 전기 및 시스템공학과 석사과정. 2015년~현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 재직.

Tel: (063) 716-2358

Fax: (063) 716-9660

e-mail: km_park@kesco.or.kr



방 선 배 (Sun-Bae Bang)

1969년 5월 18일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 2002년 강원대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사), 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2003년~현재 전기안전연구원 책임연구원.

Tel: (063) 716-2355

Fax: (063) 716-9660

e-mail: bsb1586@kesco.or.kr



김 용 운 (Yong-Un Kim)

1967년 3월 28일생. 1992년 2월 전북대 농업경제학과 졸업. 1994년 5월 소방공무원 공채. 현 전북소방본부 남원소방서 화재조사주임.

Tel: (063) 633-2119

Fax: (063) 620-3759

e-mail: hazad0@korea.kr