

가전용 커패시터의 소손원인 규명 및 발열 메커니즘 해석

박형기 · 최충석[†]

전주대학교 소방안전공학과
(2011. 9. 23. 접수 / 2011. 12. 12. 채택)

Examination of the Cause of Damage to Capacitors for Home Appliances and Analysis of the Heat Generation Mechanism

Hyung-Ki Park · Chung-Seog Choi[†]

Department of Fire Safety Engineering, Jeonju University
(Received September 23, 2011 / Accepted December 12, 2011)

Abstract : The purpose of this study is to examine the cause of damage to electrolytic capacitors and to present the heat generation mechanism in order to prevent the occurrence of similar problems. From the analysis results of electrolytic capacitors collected from accident sites, the fire causing area can be limited to the primary power supply for the initial accident. From the tests performed by applying overvoltage, surge, etc., it is thought that the fuse, varistor, etc., are not directly related to the accidents that occurred. The analysis of the characteristics using a switching regulator showed that the charge and discharge characteristics fell short of standard values. In addition, it is thought that heated electrolytic capacitors caused thermal stress to nearby resistances, elements, etc. It can be seen that the heat generation is governed by the over-ripple current, application of AC overvoltage, surge input, internal temperature increase, defective airtightness, etc. Therefore, when designing an electrolytic capacitor, it is necessary to comprehensively consider the correct polarity arrangement, appropriate voltage application, correct connection of equivalent series resistance(ESR) and equivalent series inductance(SEL), rapid charge and discharge control, sufficient margin of dielectric tangent, etc.

Key Words : electrolytic capacitor, home appliances, heat generation mechanism, ESR, SEL

1. 서론

가전 기술의 비약적인 발달의 이면에는 반도체 소자(IC)의 출현 및 전력용 디바이스의 소형화 등이 있었기에 가능하였다. 최근에 가전 및 영상 기기 등에 적용되는 커패시터, 저항, 인덕터 등은 기존의 소자에 비해 부피 및 에너지 손실이 적어 시스템을 소형으로 제작할 수 있게 되었다. 대부분의 가전 및 영상 기기는 시스템의 신뢰성을 높이기 위해 상용 교류 전원을 공급받아 정류 회로를 이용하여 직류로 변환된 전기를 이용한다. 그러나 정류된 직류에는 필연적으로 맥류(불규칙한 파형)가 포함되어 시스템의 오동작 요인으로 작용한다. 즉, 맥류의 노이즈를 제거하기 위해 적용되는 소자가 전해 커패시터이다. 전해 커패시터의 구조는 알루미늄 혹은 탄탈의 얇은 막에 전기화학적으로 산화피막을 만들고

금속 박막을 양극으로 하고, 전해액을 음극으로 제작되므로 양단에 극성이 생성된다. 알루미늄을 이용한 커패시터는 알루미늄 박막 표면을 에칭하여 유효 표면적을 증가시키고, 형성된 산화 피막에 전해액이 스며든 종이를 함께 감아서 알루미늄 케이스에 봉입한다. 알루미늄 전해 커패시터의 사용전압은 450 V 이하, 정전용량은 1~5,000 μF , 사용온도 범위는 $-40\sim 85^\circ\text{C}$ 정도이다. 전해 커패시터는 CRT(cathode ray tube)를 모니터로 사용하는 가전 및 영상 기기 등에 많이 사용되며 극성의 역사용(reverse polarity), 과전압의 인가, 급속한 충전 및 방전 등이 빈번하게 발생하는 회로에서 사고의 위험성이 있다¹⁻³⁾.

일본의 관서 전자공업진흥센터의 보고서 및 소니 부품신뢰성 핸드북 등에 의하면 CRT 모니터를 사용하는 시스템에 적용된 소자에서 사고 및 화재가 발생한 사례가 구체적으로 제시되고 있다. 또한 국내의 가전 및 영상 기기 등에서도 사고가 발생한 사례가 있으나 기업들은 자사 제품의 이미지 추락 및 판

[†] To whom correspondence should be addressed.
enetek@naver.com

매 저하를 우려하여 대외비로 분류하여 관리되는 것이 현실이다⁴⁻⁸⁾.

따라서 본 연구에서는 일반적인 가전 및 영상 기기 등에 적용된 전해 커패시터의 소손 원인을 규명하고 발열 메커니즘을 제시함에 따라 유사사고(또는 재해) 예방을 위한 과학적 근거로 확보하는데 있다.

2. 관련 이론

커패시터는 전기 및 전자 회로에 주로 사용되는 소자로 회로간의 결합, 바이패스(bypass) 회로, 저항 및 코일을 조합한 각종 필터, 코일과 조합한 공진회로, 교류전동기의 기동 및 분상용, 상용전원의 역률 개선 등에 사용되며, 종류 및 용도는 Table 1과 같이 나타낸다. 커패시터의 기본 구조는 유전체(dielectric substance) 2매의 전극판으로 씌워 타원형 또는 직충형 등으로 제작하고 양쪽에 단자(또는 리드선)를 붙인 구조로 되어 있다. 커패시터의 정전용량은 전극이 전하를 축적할 수 있는 능력의 정도를 상수로 나타낸 것으로 C 로 표시하며 식 (1)과 같이 나타낸다¹⁻³⁾.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r \frac{A}{d} \quad (1)$$

여기서, ϵ_0 [F/m]은 진공의 유전율이며, ϵ_r 은 비유전율로 물질마다 갖고 있는 상수이다. 또한 A [m²]는 전극의 단면적이며, d [m]는 전극 사이의 거리를 의미한다. 즉, 우수한 전해 커패시터를 제작하려면

비유전율이 큰 재료의 발굴이 중요한 요소이다. 그런데 우수한 전해 커패시터라 하더라도 Fig. 1과 같이 전류(I)는 전계의 세기(E)와 동상인 도전전류(I_1)가 흐르고, E 에 직각방향인 용량성 전류인 변위전류(I_2)와 합성으로 표시된다. 전류(I)가 I_2 와 이루는 각을 δ 라 하면 식 (2)와 같이 나타내며, $\tan \delta$ 를 유전정접(dielectric loss tangent)이라 한다.

$$\tan \delta = \frac{I_1}{I_2} \quad (2)$$

즉, 유전체를 전극에 끼우고 교류전압을 가하면 흐르는 전류의 위상은 유전손실이 있기 때문에 완전히 90° 진행하지 못하고 δ 만큼 늦게 된다. 이 δ 가 유전손실각이고 유전손실은 $\tan \delta$ (dielectric loss tangent)에 비례한다. 유전손실은 교류의 주파수 및 전기장의 세기가 커짐에 따라 증가하며, 일반적으로 고

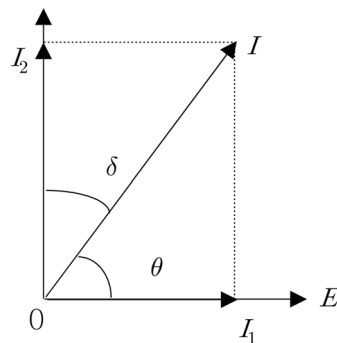


Fig. 1. Relation between the electric field and dielectric loss angle.

Table 1. Type and use of capacitor

종류	용도	특징
종이커패시터	현재 산업용 전기·전자기에 사용	신뢰성, 안정성이 우수하다.
금속종이커패시터 (MP커패시터)	텔레비전의 수평회로, 세탁기 및 냉장고 전동기의 분상용	약간 소형, 경량이다. 신뢰성이 높다.
플라스틱필름커패시터	텔레비전, 비디오 등의 전자회로에 널리 사용	소형, 경량으로 신뢰성이 높다. 전기적 특성이 좋다.
금속플라스틱필름커패시터	텔레비전, 비디오 등의 고주파회로 및 온도보상 회로 등에 사용	고주파 특성이 좋다. 가장 소형, 경량이다.
자기커패시터 (세라믹커패시터)	텔레비전, 비디오 등의 고주파회로 및 온도보상 회로 등에 사용	고주파 특성이 좋다. 가장 소형, 경량이다.
마이카커패시터	산업용 전기기기 및 용량의 정밀도를 요하는 회로에 사용	경년열화가 적다. 온도특성이 좋다. 용량의 정밀도가 좋다.
알루미늄전해커패시터	텔레비전, 비디오 등의 전원회로, 결합회로, 바이패스회로 등 다양한 형태로 사용	전기적 특성이 나쁘다. 대용량의 것이 가능하다.
알루미늄고체전해커패시터	텔레비전, 비디오 등의 전원회로, 결합회로, 바이패스회로 등 다양한 형태로 사용	저온특성이 좋다.
탄탈전해커패시터	텔레비전, 비디오 등 결합회로, 바이패스회로 등에 사용	전기적 특성이 좋다.
탄탈고체전해커패시터	텔레비전, 비디오 등 결합회로, 바이패스회로 등에 사용	가장 수명이 길다.

주파 영역에서 커진다. 유전손실의 많고 적음은 절연물의 성능을 결정하는 요소로서, 이것이 적을수록 좋은 절연재이다. 유전손실을 발생시키는 원인은 물질의 불균일, 유전여효(誘電餘效), 히스테리시스 현상 등이다¹⁻³⁾.

3. 소손된 전해 커패시터의 해석

가전 및 영상 기기 등에 사용되는 전해 커패시터의 소손 원인은 부품의 설계 여유(margin) 부족, 전해질의 이물질 혼입, 사용 환경(온도, 압력, 습도)의 부적합 및 물리적인 충격 등이 있다. Fig. 2는 사고 현장에서 수거된 전해 커패시터의 실체 사진을 나타낸 것이다. 일반 가전기기의 PCB(Printed Circuit Board)에 설치된 것으로 정상 제품(00 Elect., Co., China)의 설계 정전용량은 180 $\mu\text{F}(\pm 20\%)$ 이며, 사용 온도는 85°C 이하이다. 저압용 커패시터로 사용 전압은 400 V 이하이며, 시스템에 적용된 목적은 시스템 전원의 평화를 위한 것이다. 전해 커패시터 상부의 방폭캡이 탄화되었고, 인접한 반도체 소자의 방열판 역시 오염된 것을 알 수 있다. 그러나 현장조사에서 극성의 역사용, 과전압의 인가 및 급속한 충전 및 방전 등은 없었던 것으로 확인되었다.

Fig. 3은 소손된 전해 커패시터의 내부 상태를 해석하기 위해 나타낸 실체 사진이다. 탄화된 흔적이 없고 단지 물리적인 변형이 확인된 것으로 보아 발열에 의한 폭발 소손으로 판단된다. 이와 같은 물리적인 변화가 있었다는 것은 어떤 이유인지 단언할 수 없으나 상당시간 충전 및 방전 등에 의해 열에너지의 균형이 무너져 폭발이 발생한 것으로 유추할 수 있다.

Fig. 4는 소손된 전해 커패시터의 X-ray 패턴을 나

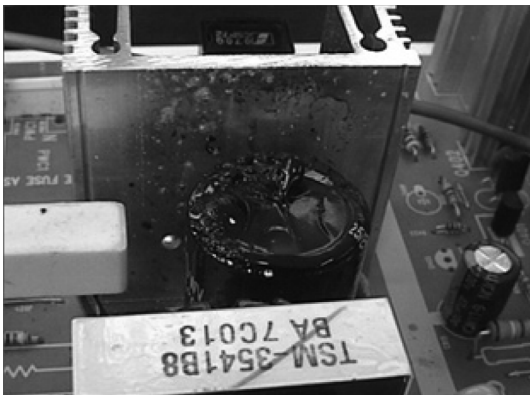


Fig. 2. Photo of the damaged electrolytic capacitor.

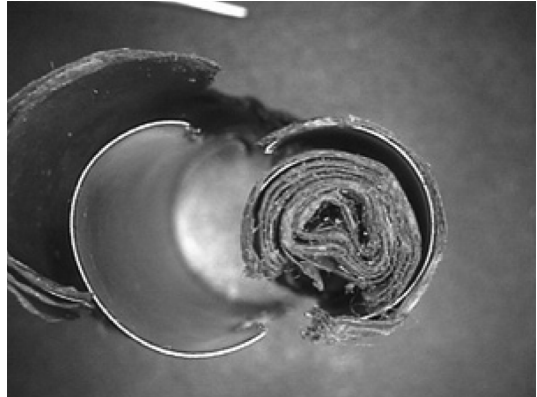


Fig. 3. Photo of the inside of the damaged electrolytic capacitor

타낸 것으로 Xs Pro-MR300(Toshiba Co., 1A, Stand, Japan)을 이용하여 측정된 것이다. 전해 커패시터 상부의 일부만이 소손되었고 내부의 균열 및 회로의 변형 흔적은 확인할 수 없었다. 즉, 전해 커패시터의 구조적인 문제는 없었던 것으로 판단되며 재료의 물성 및 전기적 신호 등의 분석이 요구된다⁷⁻¹⁰⁾.

Fig. 5는 통계분석방법(MiniTAB, 이레테크(社) Release 13. Edition)으로 전해 커패시터의 표준 정규

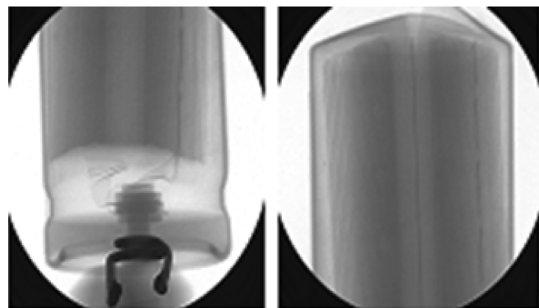


Fig. 4. X-ray pattern of the damaged electrolytic capacitor.

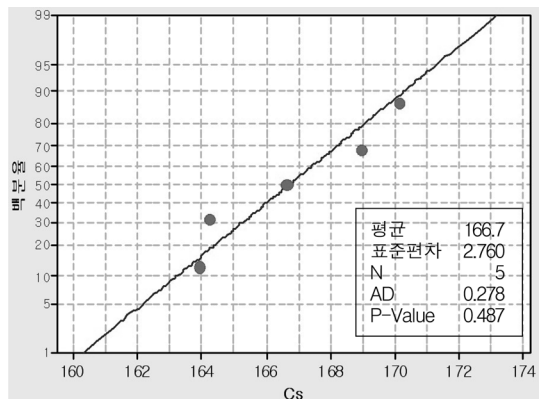


Fig. 5. Normal distribution of the electrolytic capacitor sample.

분포 특성을 나타낸 것이다. 정규분포의 검증은 수집된 데이터가 정규분포의 가정을 만족하는지 여부를 확인하기 위함이다. 정규분포 해석은 관측된 차이가 큰 경우에 적용되는 Anderson-Darling method를 적용하여 오차를 최소화하였다^{12,14}. 표준편차는 2.760, P-value는 0.487 등을 나타내므로 분석을 위해 표본 추출한 전해 커패시터는 정규 분포를 나타내는 것을 알 수 있다.

Fig. 6의 Cp는 공정능력지수(process capability index)이고, Cpk는 공정평균을 나타내며, 부품 사양에서 제시하고 있는 하한사양한계(LSL; Lower Specification Limit)는 144 μF , 상한사양한계(USL; Upper Specification Limit)는 216 μF 이다. 공정평균이 1.21로 분석된 것으로 보아 일부 공정 개선이 요구된다. 또한 부분공정능력과 전체공정능력이 같게 분석되었다는 것은 제품군 사이의 변동이 적다는 것을 의미한다. 그리고 기대내부성능(PPM)이 145.42라는 것은 100만개의 부품 중에 145개 이상이 규격 구간 이외의 성능을 보일 수 있음을 의미하므로 신뢰성 향상을 위해 정밀한 공정 관리가 필요한 것으로 판단된다^{11,13}.

Fig. 7은 전해 커패시터의 리플전류(ripple current)를 오실로스코프(DPO-7014, Tek, 1 GHz, USA)로 측정된 것을 나타낸 것이다. 커패시터에서의 정격리플전류(rated ripple current)는 규정된 온도에서 커패시터에 연속으로 인가할 수 있는 규정 주파수의 최대 허용 교류전류의 실효치이다. 전해 커패시터의 리플전류 분석은 커패시터의 발열온도 및 상용주파수 등의 해석으로 소자의 설계 여유(derating)를 확인하는 방법이다⁴). 정상 제품의 리플전류(25 $^{\circ}\text{C}$ 기준)

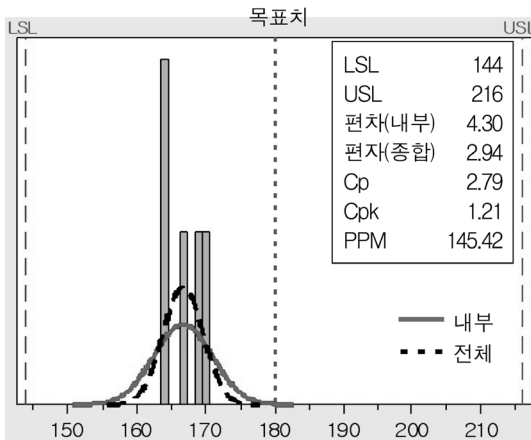


Fig. 6. Process capacity distribution of a normal electrolytic capacitor.

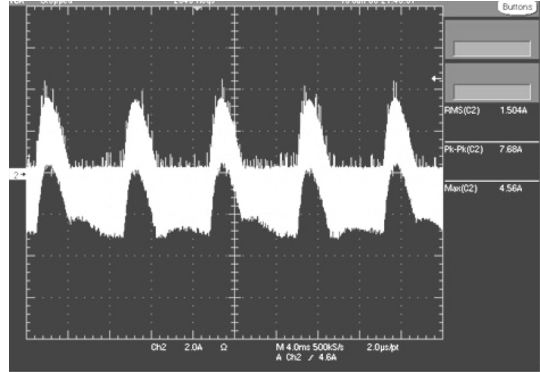


Fig. 7. Measurement of the ripple current of an electrolytic capacitor.

는 제품 이력에서 실효전류는 1.35 A로 명기되어 있으나 사고가 발생한 부품을 수거하여 리플전류를 측정된 결과 실효전류는 1.5 A로 확인되었다. 즉, 제품 사양에서 제시하고 있는 값보다 많은 전류가 흘렀다는 것은 설계 여유가 부족하여 발열이 지속적으로 발생했음을 의미하며 사고와 밀접한 관계가 있었음을 예측할 수 있다¹²).

Table 2는 전해 커패시터에 대한 전기적 특성을 평가한 결과이다. 정상 제품의 평균 정전용량(C_s)은 166.70 μF , 직렬등가저항(ESR; Equivalent Serial Resistance)은 474.2 Ω , 유전 정접(Tan δ)은 0.06 등을 나타냈으나 사고가 발생한 제품의 정전용량은 6 μF , ESR은 737 Ω , Tan δ 은 3.32 등을 나타냈다. 이러한 특성 값의 변화는 발화에 의한 영향과 부품의 초기 특성값 저하의 원인으로 구분할 수 있으며, 정전용량의 손실은 ESR에 의한 발열이 발생할 수 있음을 예측할 수 있다.

사고 제품과 동일한 사양의 전해 커패시터 특성을 측정된 결과 정격 입력의 커패시터 인가전압을 입력 전압으로 나눈 값(R)은 65 Ω , 정격 입·출력시의 순간 정전 유지시간(t)는 404 ms, 입력 최저보증전압 $E_{in}(\text{min})$ 은 220 V, 정격입력전압 $E_{in}(\text{man})$ 은 57 V 등

Table 2. Evaluation of the electric characteristics of a normal electrolytic capacitor

번호	내용	C_s [μF]	ESR [Ω]	Tan δ
1		169.23	501	0.0545
2		172.91	463	0.0554
3		169.88	482	0.0563
4		163.25	456	0.0572
5		158.23	469	0.0582
Average		166.70	474.2	0.0600

을 나타냈다. 또한 사고 제품과 동일한 사양의 커패시터의 정전 용량을 측정한 결과 평균 166.7 μF 이었다. 그리고 식 (3)에서 제시하고 있는 Shade 이론을 적용하여 이론 정전용량을 계산한 결과 217 μF 로 계산되었다. 따라서 본 시스템에 적용된 전해 커패시터는 이론 정전용량보다 50 μF 정도 적은 것이 사용됨에 따라 시간의 경과에 따라 반복적인 스트레스로 열화(劣化)가 가속된 것으로 판단된다.

$$C_s \geq - \frac{t}{R \times L_n} \frac{E_{in}(\min)}{E_{in}(\max)} \quad (3)$$

R : (정격입력시 커패시터의 인가전압)²/입력전력
 t : 순간 정전 유지시간(holding time)
 $E_{in}(\min)$: 입력최저보증전압(입력의 하한값)
 $E_{in}(\max)$: 정격입력전압

시스템에 적용된 전해 커패시터의 불량에 따른 발화 원인을 추정하기 위해서 Fig. 8과 같이 포화점에 대한 전류를 측정하였다. 트랜스의 포화점을 기준으로 해석하면 포화점에서의 전류는 5.08 A이다. 따라서 부하경감계수(derating factor) 0.8을 고려한 전류의 첨두치 3.3 A로 나누어 1.23을 얻을 수 있다. 즉, 트랜스는 약 23%의 여유(margin)를 가짐을 확인할 수 있으므로 트랜스의 영향은 고장 발생의 주요 원인과 관련이 없음을 알 수 있다¹²⁾.

Fig. 9는 전해 커패시터의 스위칭 IC (STR-W6753, Sanken Co.,Ltd, Japan)에 대한 전기적 특성을 분석한 것이다. 스위칭 IC에 대한 Drain과 Source 사이의 전압과 Drain 전류의 안정화 영역(ASO; Area Safety Operation)에 대한 분석에서 V_{ds} 는 520 V, I_d 는 2.6

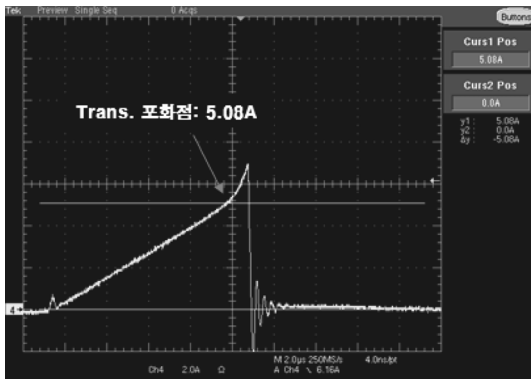


Fig. 8. Evaluation of the upper limit current for the transformer knee point.

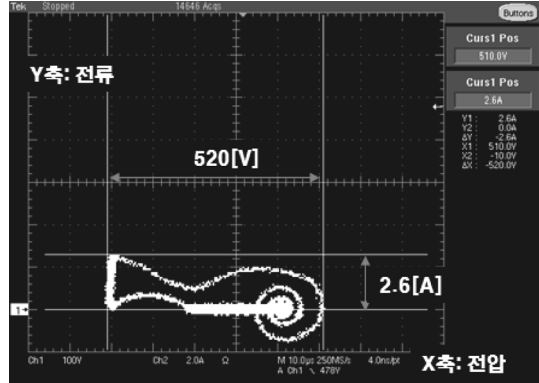


Fig. 9. Energy range of the switching IC(STR-W6753) ASO.

A 등으로 측정되었으며, 정상 제품의 사양에서 제시하고 있는 ASO 영역 내에 존재하는 것을 확인할 수 있었다¹¹⁾. 즉, 스위칭 IC에 의한 사고 발생의 가능성은 희박한 것으로 판단된다.

4. 전해 커패시터의 발열 메커니즘

가전 및 영상 기기에 적용되는 전해 커패시터의 발화 메커니즘 분석에서 전해 커패시터의 설계 여유, 절연특성, 등가직렬저항 및 등가직렬인덕턴스, 충전 및 방전 특성 등 다양한 요소가 상호 연관되어 있는 것을 알 수 있다. 또한 과전류 검출 저항의 특성 변화가 스위칭 IC의 Source part로 유입되어 내부의 절연파괴(Drain 포함)를 초래한 것으로 발화 원인에 대한 진행과정을 설명할 수 있다. Fig. 10은 전해 커패시터의 일반적인 잠재적 고장 형태 및 특성 분석에 적용되는 FMEA(Failure Mode Effects Analysis)의 개략도를 나타낸 것이다. 즉, 전해 커패시터의 선정 및 설계에서 고려해야 할 내용으로는 역극

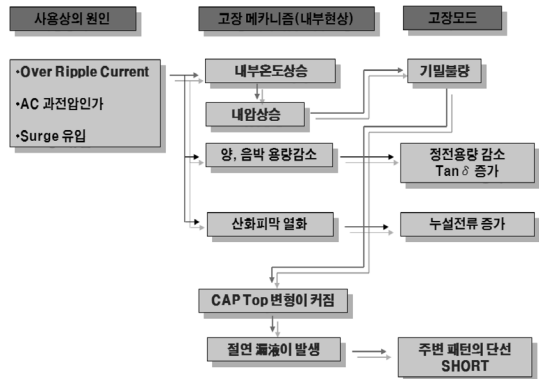


Fig. 10. Schematic diagram of the (FMEA) Failure Mode Effects Analysis.

성 사용, 정격전압, 리플전류, 급속 충전 및 방전, 등가직렬저항, 누설전류, 주위온도에 따른 수명 등이 있다. 이와 같은 고장 발생의 요소 및 발화 가능성 등을 설계 단계에서 표준작업절차(SOP; Standard Operating Procedure)의 준수가 신뢰성 향상에 기여할 것으로 판단된다^{11,15)}.

전해 커패시터를 시스템에 적용할 때 극성을 반대로 연결하면 발열에 의한 파괴 또는 화재 발생 등을 예측할 수 있고, 인가전압은 정격전압의 60~80%에서 사용하는 것이 최적의 성능을 나타낸다. 또한 리플전류 및 등가직렬저항(ESR; Equivalent Series Resistance) 등에 의한 열이 발생하여 커패시터 내부에 가스가 발생하게 되므로 시간의 경과에 따라 충전된 전해액의 분해 및 소비가 일어나고 정전용량이 감소하게 된다. 커패시터가 방전될 때 역기전력에 의한 음극화가 진행하게 될 수 있고 용량이 감소하며 내부 온도가 상승하게 된다. 또한 반복적인 충전 및 방전 등이 빈번하게 발생하거나 급격한 전류의 유출입에 의한 수명의 단축 및 발열 등을 고려해야 한다. 등가직렬인덕턴스(ESL; Equivalent Series Inductance)는 고주파수인 경우 시스템에 미치는 영향이 크므로 무유도성이 되도록 시정수를 적절하게 조정해야 한다. 시스템에서 발생할 수 있는 누설전류는 유전분극 뒤틀림, 유전체의 용해, 생성, 흡기 흡착 등이 지배하므로 작업 중에 인체의 손상 및 감전 등의 주의가 필요하다. 아레니우스 법칙에 따르면 사용하는 부품 주위 온도가 10℃ 상승할 때마다 2 배의 수명이 단축되는 것으로 제시하고 있으므로 내구 수명 연장을 위해서는 적절한 온도를 유지하는 것이 중요하다. Fig. 11에 전해 커패시터의 등가회로를 나타냈으며, 기기마다 적합한 최적의 시정수가 필요하다. 알루미늄 전해 캡(cap)에서의 인피던스 특성을 고려하면 공진주파수 대역 이하에서는 저항성분으로 작용하고 이후에서는 리액턴스 성분으로 나타나는 U-Type 곡선을 나타내므로 설계에서는 어려운 면

이 있지만 상호 특성을 고려한 최적의 용량을 결정하는 것이 요구된다⁵⁾.

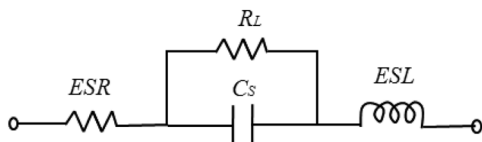
5. 결론

가전 및 영상 기기 등에 사용되는 전해 커패시터의 소손 원인을 규명하기 위해 소손패턴, 공정능력 평가, 트랜스 포화점에 대한 전류 상한치 평가 등을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 사고 제품의 실체분석에서 최초의 사고는 1차 측 전원으로 발화 영역을 한정할 수 있었다.
 - 2) 과전압 및 서지 등에 대한 재현 실험을 통해 퓨즈, 바리스터 등은 사고와 직접적인 관련성이 없는 것으로 판단된다.
 - 3) 전해 커패시터의 공정 능력 특성 해석에서 충전 및 방전 특성 등이 기준치(180)에 미달하는 것으로 확인되었다.
 - 4) 정상 제품의 리플전류는 제품 이력에서 실효전류는 1.35 A로 명기되어 있으나 사고가 발생한 부품을 수거하여 리플전류를 측정한 결과 실효전류는 1.5 A로 확인된 것으로 보아 설계 여유가 부족한 것으로 판단된다.
 - 5) 전해 커패시터에서 발열이 발생하는 경우 인접한 저항 및 소자 등에도 반복적인 열적 스트레스가 인가될 수 있고 시스템의 급격한 온도 상승으로 폭발이 발생할 수 있다.
- 따라서 가전 및 영상 기기 등에 적용되는 전해 커패시터를 설계할 때의 고려 사항은 정확한 극성의 적용, 적절한 전압의 인가, 적절한 ESR 및 ESL의 적용, 급속한 충전 및 방전의 제어, 충분한 유전정접 여유(margin) 확보 등을 종합적으로 고려할 필요가 있다.

참고문헌

- 1) 전춘생, “표준전자기학”, 동명사, pp. 243~246, 1988.
- 2) 최충석 외 5, “전기화재공학”, 도서출판 동화기술, pp. 189~198, pp. 304~306, 2004.
- 3) 권기영 외 6 역, “전기전자공학개론”, 한빛미디어, pp. 216~228, 2010.
- 4) 日本工業調査會, “電子部品大事典”, pp. 188~120, 2002.
- 5) R&D CENTER, “最新電子部品デバイス實裝技術便覽”, pp. 93~111, 2004.
- 6) 關西電子工業振興セソタ信賴性分科會, “故障を



ESR: 등가 직렬 저항
 ESL: 등가 직렬 인덕턴스
 Cs: 정전 용량
 RL: 양극 산화 피막의 등가 병렬 저항

Fig. 11. The equivalent circuit of an electrolytic capacitor.

- ゼロにする信頼性技術”, pp. 298~300, 1990.
- 7) 日本 SONY, “品質新頼性ハンドブック”, pp. 231~233, 2000.
 - 8) TOSHIBA Coporation, “Reliability Testing”, pp. 3~41, 2002.
 - 9) 송병섭, 조재립, “초가속수명시험(HALT) 및 고장 분석을 이용한 실장기판의 신뢰성 향상방안“, 한국신뢰성학회논문지, 제4권, 제2호, pp. 121~124, 2004.
 - 10) 이종범, 정원, “지속가능한 제품재설계를 위한 신뢰성기법의 적용방법”, 한국신뢰성학회논문지, 제9권, 제4호, pp. 343~349, 2009.
 - 11) 박형기 외 5, “영상 가전제품에서의 발화 메커니즘 연구”, 한국화재조사학회 추계학술대회, pp. 67~79, 2009.11.
 - 12) 編輯部, “月刊 トランジスター 技術”, pp. 45~48, 2006.11.
 - 13) 電源評價技術, “TDK-Lambda Power Systems Business Group”, pp. 124~129. 2005.
 - 14) (주) 테크월드기술정보실, “월간전자부품”, pp. 32~33, 1997.
 - 15) 박형기, 최충석, “가속수명시험(HALT)에 의한 가전제품 PCB의 위험요소 발굴”, 한국안전학회춘계 학술대회, p. 15, 2011.5.