발표 2

영상 가전 제품에서의 發火 메커니즘 연구

Study on The Fire Mechanism of The Household CRT Display

박형기 · 문진철[*] · 최충석[**] · 권현석[***] · 이정일[****]

H. K. Park · J. C. Moon[*] · C. S. Choi[**] · H. H. Kwon[***] · J. I. Lee[****]

대우일렉트로닉스 · 충북테크노파크[*] · 전주대학교[**] · 분당소방서[***] · 동대문소방서[****]

1. 서 론

정보 통신 기술의 발달로 인하여 정보를 기반으로 하는 새로운 산업이 급격히 발전하고 있으며, 이를 위한 정보표시 매체 산업 역시 급속히 성장하고 있다. 지난 50 년간 대표적인 전자 디스플레이로 군림하였던 CRT(Cathode Ray Tube)는 이동성이 결여돼 있고 공간, 무게, 소비전력, 표시 해상도 등의 제약으로 인해 신개념의 정보표시 매체로서 부적합하며, 따라서 정보표시 매체로서의 요구조건에 부응하며 기존의 CRT를 대체하는 LCD, PDP, 유기EL 디스플레이 등의 평판 디스플레이 산업이 급속히 성장하고 있다. 하지만 CRT(cathode ray tube)는 세계적으로 판매수량이 지속적으로 증가하고 있는 추세이며 평면화(Slim)를 통해 타 디스플레이제품의 틈새시장을 공략하고 있는 것이 현실이다. 특히 중남미, 동유럽 시장에서의 CRT TV는 아직도 평판 TV보다는 시장 판매율이 우세하고 가격대비 소비자 만족도는 큰 편이다. 국가 화재 통계를 보면 화재발생 점유율은 전기, 방화, 가스, 유류, 마찰, 화학적 작용 등으로 인한 화재 순으로 이중 전기화재에는 가전제품이 포함된다. 또한 가전제품은 전기를 사용하는 제품으로 전기화재로 분류되며 화재원인으로는 불량부품에 의한 화재, 사용 부주의에 의한 화재, 고의적인 화재 등이 있으며 시장의 가격경쟁력으로 인한 저가형 추세와 더불어 화재의 빈도수가 증가하는 추세이다. 가전제품 화재와 관련하여 한국소비자 보호원에 접수(2007년)된 위해사례는 총 218건인데 단일품목으로 전기매트가 32.1 %(1위), TV 9.6 %(2위)를 차지하고 있다. 화재의 주요 발생 원인을 보면 첫 번째는 제품 노후화 및 사용환경 두 번째로는 사용자 부주의, 세 번째는 부품결함으로 나누어질 수 있다[1].

본 연구에서는 해외, 특히 중남미, 아중동 지역의 가정 및 숙박업 분야에서 가장 많이 사용되고 있는 CRT(cathode ray tube) TV의 부품결함에 의한 화재사고의 예에 대해 분석한 연구로서 Field에서 발생된 제품의 발화형태와 고장메커니즘의 분석을 통해 발화의 근본원인이 되는 부품에 대한 설계 및 신뢰성 관련 대책을 제시하는 것에 목적이 있다.

2. 본 론

가전제품의 발화원인으로 작용하는 근본적 원인에는 여러 가지를 들 수 있으나 일반적으로 분류하면 부품의 설계 Margin 부족, 특성 결함 및 회로의 H/W & S/W 신뢰성 원인, 이물질 혼입에 의한 원인, 주위 환경에 따른 진동· 온도 · 습도 등의 원인으로 나눌 수 있다. 이러한 발화 원인 중 본 논문에서는 해외시장에서 화재발생의 근본적 원인을 규명하였으며 항구적인 대책 및 부품시정수의 변경 등을 통해 최고의 안정된 제품을 사용자에게 제공해야 할 필요성이 있다.

2.1. 화재 제품의 분석

가전제품의 근본적 원인을 규명하기 위하여 외형관찰을 실시하였다. 주요 소손부위는 전해 커패시터, 스위칭 레귤레이터, 방전 저항부위를 중심으로 소손의 정도가 심해서 전소한 형태를 보이고 있으며 이러한 발화의 열로 인하여 CRT 브라운관의 일부 크랙이 발생한 것으로 보인다. Fig. 1에서는 화재제품 주요부품 외관 형태를 보여주고 있다.

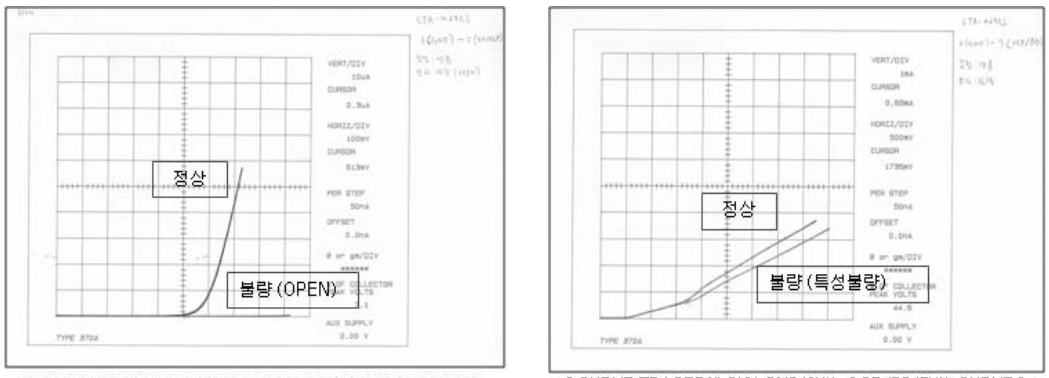
Fig. 1. 화재 제품의 주요부품 외관 관찰

일반적인 가전제품의 발화원인 및 고장분석에 있어서 발생형태의 외관 확인 및 설계회로도의 검토는 필수적 요소이다. 특히, 발생 원인을 추정하고 고장원인을 위한 재현시험에 있어서 중요한 내용이므로 발화부위는 잘 관찰해야 할 필요가 있다. 분석내

용은 1차측 전원을 2차측으로 변환시키는 트랜스를 중심으로 하여 2차 측의 각 부품에 대하여 전기적 특성을 측정한 결과 2차 측의 부품 등에는 특성저하 및 부품 불량 등의 현상이 발생하지 않았으며 이것으로 화재의 발생 부위는 1차측 전원에 관계한 부품 및 과전압, 서지 등에 의한 부품의 순간적 특성불량 원인, 부품불량 원인으로 추정할 수 있다.

다음단계로는 정상동작하는 부품과 발화에 의해 손상된 부품간의 특성평가를 통해 좀더 고장 원인 및 부품에 대하여 접근할 수 있게 된다. 스위칭 레귤레이터에 대한 전압과 전류에 대한 전기적 특성평가를 측정하였으며 Fig. 2에 나타내었다.

스위칭 레귤레이터란 입력전압에 관계없이 레귤레이터가 가지는 특유의 출력 전압만을 출력해주며 이러한 기능을 스위칭 동작으로 출력해주는 것이 스위칭 레귤레이터라고 한다. 발화에 의해 손상되어진 스위칭 레귤레이터는 정상 부품에 비해 각 단자간의 OPEN 및 불량의 형태를 가지며 정상부품의 회로 설계 검증을 통해 ASO(Area Safety Operation, 안전 동작 영역, Drain-Source간 전압과 Drain 전류의 안정화 영역)의 특성 측정을 통해 고장 원인을 추정할 수 있다.



[CURVE TRACER에 의한 GND(3번)-SS/OLP(5번) CURVE]

[CURVE TRACER에 의한 GND(3번)-OCP/BD(7번) CURVE]

Fig. 2. 스위칭 레귤레이터의 특성 측정

이때 사용된 전기적 특성을 확인하는 계측기(TDK社, 370A)는 전압의 변동에 따라 전류의 변화량을 측정하는 계측기로서 일반적인 능동소자의 전기적인 특성을 확인할 때 사용하는 계측기이다. 다음으로는 전해커패시터에 대한 전기적 특성 및 비파괴시험을 수행하였으며 Fig. 3에 나타내었다.

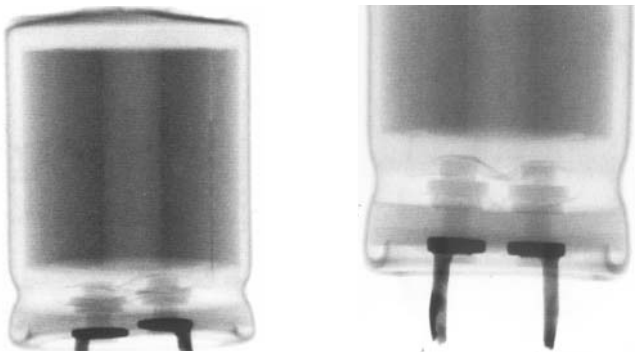


Fig. 3. 전해커패시터의 내부사진(비파괴검사)

전해 캐패시터의 경우 화재의 영향으로 커패시터 상부 방폭캡의 소손 및 PCB면의 탄화가 발생하였으며 이에 대한 전기적 특성을 측정하였으며 정전용량의 경우 정상품은 166.6uF, 직렬등가저항 (ESR) 492Ω, 유전율손실값(Tanδ) 0.05을 나타내었으나 화재 발생 부품의 경우 정전용량은 6uF, 직렬등가저항(ESR) 737Ω, 유전율 손실값(Tan δ) 3.32을 나타내었다. 이러한 특성값의 변화는 발화에 의한 영향과 초기 부품의 특성값 저하의 원인으로 구분할 수 있으며 정전용량의 손실은 직렬 등가저항(ESR, Equivalent Serial Resistance)에 의한 발열의 발생으로 나타나며 궁극적으로는 피로파괴로 진행하게 된다.

1차측 전원을 2차측 전원으로 전압의 승압 또는 강압 변환시키는 트랜스포머의 경우 인덕턴스(Inductance) 및 DC Resistance, 절연내압(Withstanding Voltage), 절연저항(Insulation Resistance)등에 대하여 특성값을 측정한 결과 특성치의 저하 등의 원인은 없었으며 이러한 경우 1차측 전원단의 발화가 원인임을 추정하는 중요한 근거가 된다. 마지막으로 교류전원이 인가되는 경우 과전압, 서어지(Surge) 전압등의 순간적 인입, 과전류으로 인한 제품의 손상을 방지하기 위하여 회로 및 안정화 측면에서 단락이 되는 휴즈(Fuse)에 대하여 비파괴시험을 진행하였다. Fig. 4에서와 같이 과전압 및 과전류의 인입에 의해 휴즈는 국부적 온도상승을 수반하고 용융단선이 발생하여 지속적인 과전압, 과전류을 차단함으로 가전제품을 보호하게 되는데 본 연구에 사용된 화재제품의 경우 비파괴분석결과 용융, 단선등의 현상은 확인되지 않았다. 이러한 발화에 영향을 받은 각각의 부품에 대하여 특성측정 및 비파괴시험, 회로설계검증을 통하여 발화의 원인을 구체화 할 수 있다.

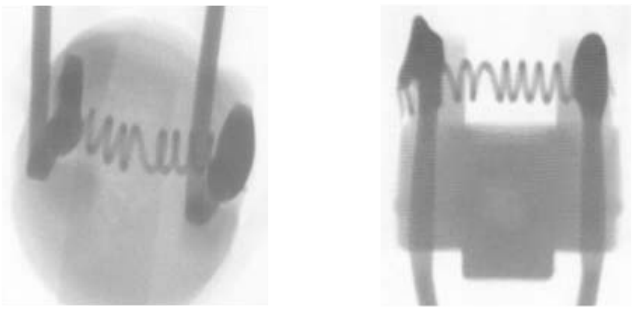


Fig. 4. 퓨즈(Fuse)의 내부사진(비파괴검사)

2.2 고장 원인 분석

발화의 근본 원인을 알아보기 위해 화재 제품에 대한 각각의 부품에 대하여 특성평가를 측정하였다. 위에서 확인한 결과와 같이 외적인 환경요소(온도, 습도, 진동)등의 원인보다는 PCB의 부품특성불량으로 인한 발화의 원인을 추정하기 위하여 정상부품에 대한 좀 더 구체적인 특성평가를 수행하였다. Fig. 5는 Trans 포화점에 대한 전류값, Fig. 6은 스위칭 레귤레이터에 대한 전기적 특성을 나타내었다. 트랜스포머의 포화점을 기준으로 살펴보면 포화점에서의 전류는 5.08[A], 부하경감계수(Derating Factor) 0.8에 대하여 전류 피크치 3.3[A]으로 나누면 1.23 즉, 트랜스포머의 고온을 고려하면 약 23%의 여유(Margin)를 가짐을 확인 할 수 있었으며 스위칭 레귤레이터에 대한 ASO영역(Drain-Source간 전압과 Drain 전류의 안정화 영역)에 대한 측정결과 Vds는 520[V], Id는 2.6[A]임으로 ASO영역 내에 존재함으로 부품규격을 만족한다고 할 수 있으며 측정결과를 Fig. 7에 나타내었다.

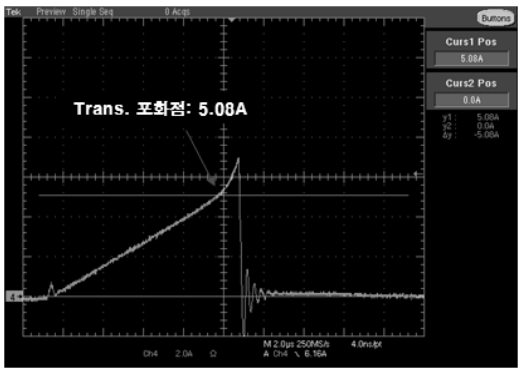


Fig. 5. TRANS. 포화점에 대한 전류 상한치

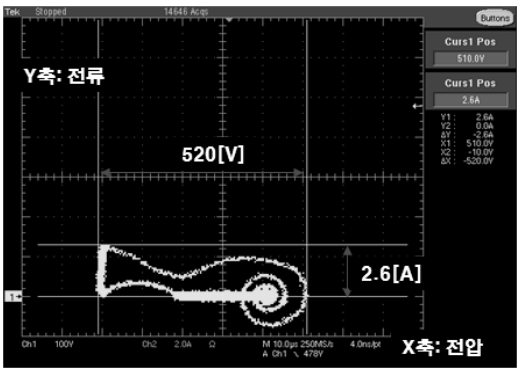


Fig. 6. 스위칭레귤레이터 전기적 특성

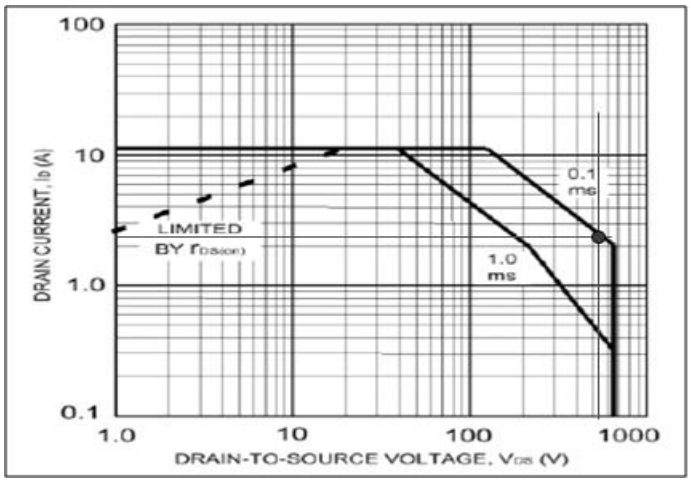


Fig. 7. 스위칭레귤레이터 ASO 영역

다음으로는 트랜스포머 2차측의 Line Regulation에 대한 측정을 실시하였으며 Table 1에 결과치를 나타내었다. 교류전원의 전압변동에 따른 2차측의 출력 전압을 확인한 결과 부품규격을 만족함으로 발화의 원인으로 추정되지는 않는다.

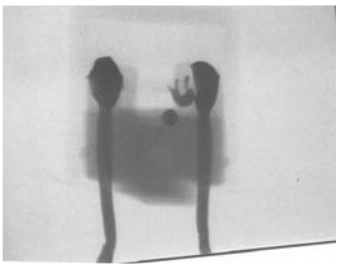
Table 1. 트랜스포머의 Line Regulation 결과

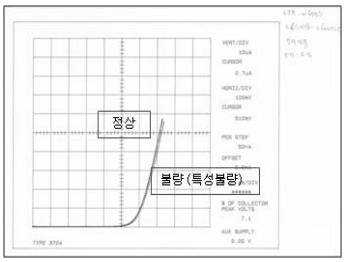
화재제품	176 [V]ac	220 [V]ac	264 [V]ac
S1+S2(125V)	124.6	124.6	124.5
S2(45V)	42.2	42.24	42.2
S3(13V)	12.8	12.81	12.8
S4(18V)	17.1	17.19	17.1

발화의 원인으로 가전제품의 큰 비중을 차지하는 것이 과전압[2] 및 서어지(Surge)에 의한 영향이 큼으로 화재 발생 제품과 제조년월이 동일한 제품에 대하여 과전압시험(370[V]ac)에 대하여 Fig. 8에 나타내었다. 전해커패시터의 경우 상부 방폭캡 손상, 휴즈(Fuse)의 용융단선, 의 특성불량등의 현상이 발생하였으며 발화제품에서의 현상과는 차이점을 보였다. 또한 Fig. 9에서와 같이 서어지(Surge)시험을 7[kV] DC인가하여 살펴본 결과 전해커패시터의 방폭, 휴즈(Fuse)의 용융단선, 스위칭 레귤레이터의 파손 등이 발생하였고 화재발생은 없었다. 이러한 결과를 토대로 발화의 원인을 추정하면

가전제품을 사용하는 곳에서의 과전압 및 서어지에 의한 발화의 발생은 없다고 판단할 수 있다.

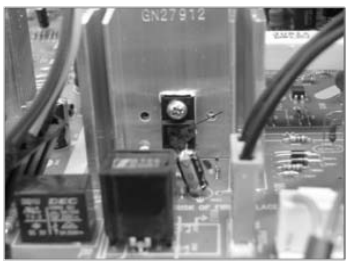
(a) 전해커패시터

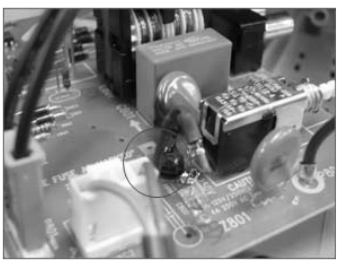

(b) 퓨즈(Fuse)



(c) 스위칭 레귤레이터

Fig. 8. 과전압시험(370[V]ac) 결과


(a) 스위칭 레귤레이터


(b) 퓨즈(Fuse)

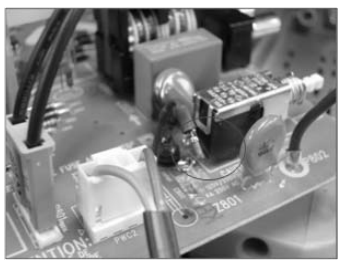

(c) 바리스터

Fig. 9. 서어지(Surge)시험(7[kV], DC) 결과

다음은 전해커패시터에 대한 부품특성분석을 실시하였다. 발화의 원인을 알아보기 위해 동일 Lot의 전해커패시터에 대하여 전기적 특성평가 결과를 Table 2에 나타내었고 Fig. 10에는 공정능력지수를 나타내었다. 또한 Fig. 11에는 리플전류(Ripple Current)를 측정한 결과를 나타내었다. 전해커패시터의 경우 중국 동양광제(주)의 부품으로 400[V], 180[uF](±20%)의 규격을 가지고 있다. Table 2에서와 같이 용량의 범위는 164~170[uF]의 범위를 가지며 측정결과 중심값보다 낮은 하한치에 편중되어 있음을 알 수 있었다. Fig. 10에서는 정상품의 용량측정을 통해 공정능력지수를 분석(MiniTAB Release 13 Edition)한 결과 잠재적 공정능력 Cpk가 1.76으로 공정개선이 필요한 단계로 분석되었다.

Table 2. 전해커패시터의 전기적 특성

양품시료구분	Cs [uF]	ESR [mΩ]	TAN[δ]
1	166.6	492	0.0535
2	168.91	423	0.0534
3	163.88	442	0.0543
4	170.09	426	0.0542
5	164.22	464	0.0572
평균	166.74	449.4	–

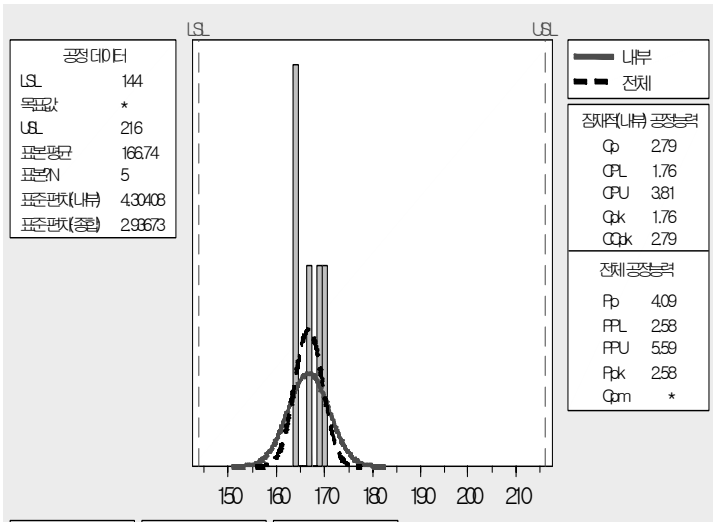


Fig. 10. 전해커패시터의 공정능력 분석

전해커패시터의 분석방법중 실제 회로에서의 리플전류(Ripple Current)[3]를 측정하고 커패시터의 발열온도 및 상용주파수의 관계를 이용하여 전해 커패시터의 설계여유를 확인하는 방법이 있으며 각각의 전해커패시터는 용량과 리플전류값이 규격화되어 있으며 이것은 수명에 영향을 미친다. 동양광제(주)의 전해 커패시터는 85℃ Type, 400[V], 180[uF]이며 리플전류는 1.35[Arms]로 명기되어 있으나 이러한 전해커패시터에 대한 리플전류를 측정한 결과 상온기준(25℃)에서 1.5[Arms]로 측정되어 규격대비 약 160%을 초과하는 결과를 보이고 있으며 Fig. 11에 측정값을 나타내었다. 전해 커패시터의 용량계산에 이론적 접근은 “Shade 이론” 을 적용할 수 있으며 식 1과 같이 표현되어진다.

$$C \geq -\frac{t}{R \times \mathrm{Ln}\frac{Ein(\min)}{Ein(man)}} \qquad \text{(식 1)}$$

여기서, R은 (정격입력시의 콘덴서 인가전압)2/입력전압, t는 정격입출력시의 순간정전유지시간(sec), Ein(min)은 입력최저보증전압, Ein(man)은 정격입력전압을 의미한다.

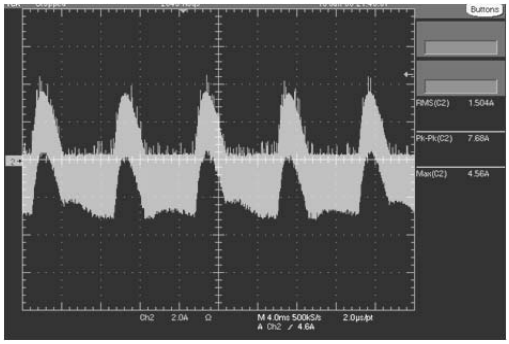


Fig. 11. 전해커패시터의 리플전류 측정

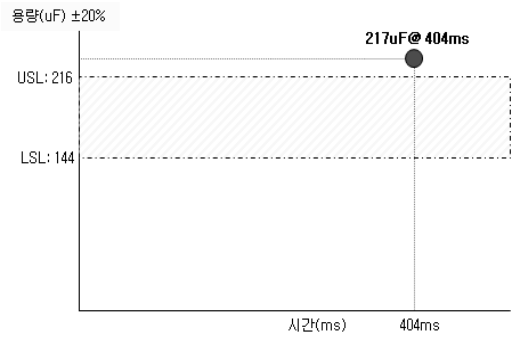


Fig. 12. "Shade 이론"에 의한 용량 계산결과

전해 커패시터의 용량계산을 위해 측정해본 결과 R: 65[W], t: 404[ms], Ein(min): 220[V], Ein(man): 57[V]이며 결과값을 "Shade 이론" 에 적용한 결과 전해커패시터의 용량은 217uF로 계산되었으며 실제용량 180uF보다 많은 용량이 필요하다는 것을 Fig. 12에서와 같이 알 수 있다. 또한 적용대책 측면에서는 정전용량 및 리플전류를 고려하여 400[V], 330uF, 85℃ Type으로 변경하는 것이 바람직하다고 보인다. 이를 근거로 시장에서 발생된 발화의 원인은 전해 커패시터[4]의 용량부족 및 특성불량이 기인하여 발화의 원인을 제공한 것으로 판단할 수 있다.

2.3. 발화 메커니즘 규명

해외 시장에서 발생되는 발화의 원인을 규명하는 것은 매우 어려운 일이다. 이것은 단순한 한가지의 원인일 수 있지만 대부분 발화에 의한 소손 및 전소의 단계를 거침으로 근본적 원인을 찾는 것은 시간적, 경제적 지출 비용이 증가한다. 그러나 제조자의

입장에서는 소비자의 안전한 사용을 책임질 의무가 있기에 발화의 근본적 원인 및 잠재적 발생 가능한 것들에 대한 대책을 수립해야 한다. 가전제품의 경우 발화 메커니즘을 분석한 결과 전해 커패시터의 특성불량으로 인해 Snubber 커패시터 파괴 및 보호저항의 특성변화를 유발하였고 과전류검출저항의 특성변화가 스위칭 레귤레이터의 Source부로 유입되어 내부적 파괴(Drain포함)를 초래한 것으로 발화의 원인에 대한 진행과정을 설명할 수 있으며 Fig. 13에는 전해 커패시터의 일반적인 잠재적 고장형태 및 영향분석[5]을 나타내는 FMEA(Failure Mode Effects Analysis) 모식도를 나타내었다. 이러한 전해 커패시터의 선정 및 설계시 고려해야 할 내용으로는 역극성사용, 정격전압, 리플전류, 급속 충/방전, 등가직렬저항, 누설전류, 주위온도에 따른 수명 등의 전반적인 문제점등을 고려해야 하며 이러한 고장 발생원인 요소 또는 이로 인한 발화의 근본원인 가능성을 사전에 심도있게 분석하는 신뢰성 및 고장분석 과정이 수반되어야한다.

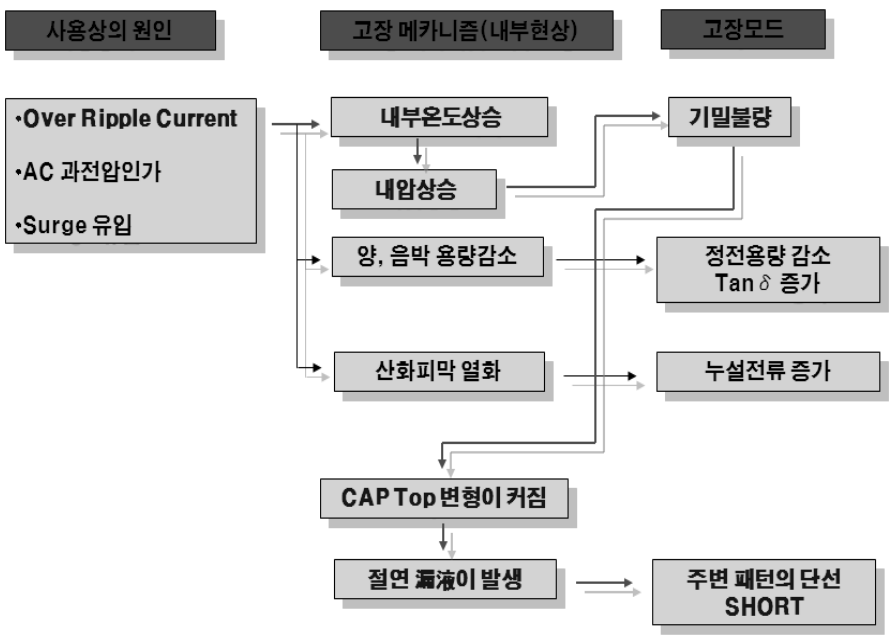


Fig. 13. FMEA(Failure Mode Effects Analysis) 개략도

3. 결 론

해외 시장에서 화재제품에 대하여 발화원인분석 및 개선안 대책, 발화메커니즘을 규명하는데 목적이 있다. 발화의 원인을 추정하기 위해 화재제품 PCB의 각 부품에 대한 특성평가를 통해 1차측 전원단으로 발화 원인 분석 영역을 선정하였으며 과전압 및 서어지(Surge)에 의한 재현시험을 통해 휴즈, 바리스터 등에 의한 원인은 아님을 확인하였다. 발화원인 가능한 부품에 대한 고장분석을 통해 전해커패시터의 특성불량이 원인임을 확인하였으며 전해커패시터의 특성불량 부품의 적용으로 인해 스위칭 레귤레이터의 특성불량을 초래하고 그 영향으로 전해커패시터의 특성불량은 다른 저항 및 관련부품에 악영향(Demage)을 초래했으며 이러한 반복적 스트레스에 의해 발화의 원인을 초래한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 소비자시대, 『가전제품 화재사고』, 2008, pp.24-25
2. 오리진 電氣 柱式會社, 『電源 納入 사양서』, 2002, pp.1-13
3. 日本 CQ 出版社, 『電子回路 設計의 基楚知識』, 2005, pp.59-63
4. 소니 株式會社, 『電子 部品과 그 活用』,1995, pp.50-58
5. 關西 電子 工業進興센터, 『故障을 제로로 하는 信賴性 技術』, 1990, pp.173-187